

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Karlo Repar

Zagreb, 2016.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Doc. dr. sc. Irena Žmak, dipl. ing.

Student:

Karlo Repar

Zagreb, 2016.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se mentorici doc. dr. sc. Žmak na profesionalnom odnosu i uloženom trudu za vrijeme izrade rada. Zahvaljujem se također na susretljivosti, ugodnoj radnoj atmosferi, stručnim savjetima, optimizmu i zainteresiranosti.

Zahvaljujem se također svojem bivšem mentoru pokojnom prof. dr. sc. Gojku Mariću čija su me zanimljiva predavanja zainteresirala i uvela u svijet kompozita.

Također se zahvaljujem doc. dr. sc. Ani Pilipović na velikoj pomoći i stručnim savjetima prilikom izrade eksperimentalnog dijela rada. Bez njezine opreme izrada ovog rada ne bi bila moguća.

Veliko hvala laborantu Božidaru Bušetinčanu na uloženom trudu, stručnim savjetima i profesionalnoj pomoći bez kojeg izrada eksperimentalnog dijela ne bi bila moguća.

Veliko hvala mome ocu na pomoći i savjetima prilikom izrade eksperimentalnog dijela.

Zahvaljujem se gospodinu Petru Franjeviću i gospodinu Stjepanu Borkovcu bez kojih izrada kalupa ne bi bila moguća.

Veliko hvala gospodinu Marijanu Gudelju što je ustupio glazbeni studio, te je svojim znanjem i iskustvom bitno pomogao pri ispitivanju akustičnih svojstava.

Veliko hvala mome kolegi i prije svega prijatelju Vjekoslavu Vurneku na potpori, savjetima i zajedničkom interesu u kompozitnim materijalima.

Veliko hvala mojoj obitelji na razumijevanju i potpori koju su mi pružili tijekom studiranja.

Ovaj rad posvećujem mojim roditeljima Dragutinu i Dragici čija potpora tokom studija i života nikad nije izostala.

Karlo Repar



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo
materijala i mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Karlo Repar**

Mat. br.:
0034050086

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Izrada glazbenog instrumenta bubnja od zelenog kompozita**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Drum as a musical instrument made from green composite**

Opis zadatka:

Bubanj je najstariji i najrasprostranjeniji glazbeni instrument, kod kojeg zvuk nastaje udaranjem čvrstog tijela o membranu razapetu na cilindričnom tijelu. Tradicionalno su bubnjevi izrađeni spajanjem šuplje drvene cilindrične posude s membranom od prirodne kože. Danas se bubnjevi izrađuju i s polimernim membranama te s metalnim kućištima u cilju smanjenja mase i cijene bubnja. Kako bi se smanjila masa, kućište bubnja moguće je izraditi i od kompozitnih materijala. Ukoliko su i vlakna ojačala i polimerna matrica kod kompozita prirodnog podrijetla, riječ je o zelenom kompozitu. Zeleni su kompoziti u potpunosti biološki razgradivi i stoga najmanje štetni po okoliš na kraju svog životnog vijeka, ali i tijekom proizvodnje materijala i proizvodnje proizvoda.

U okviru ovog diplomskog rada potrebno je:

- 1) izabrati vlakna i materijal matrice za izradu kućišta glazbenog instrumenta bubnja od zelenog kompozitnog materijala
- 2) od izabranih komponenata izraditi zeleni kompozitni materijal, iz njega izrezati ispitna tijela i ispitati mehanička svojstva
- 3) izraditi kućište bubnja od zelenog kompozita po uzoru na usporedivi drveni bubanj
- 4) ispitati akustična svojstva kompozitnog bubnja i usporediti ih sa svojstvima drvenog bubnja.

Zadatak zadan:

10. ožujka 2016.

Zadatak zadao:


Doc. dr. sc. Irena Žmak

Rok predaje rada:

12. svibnja 2016.

Predviđeni datum obrane:

18., 19. i 20. svibnja 2016.

Predsjednik Povjerenstva:


Prof. dr. sc. Franjo Cajner

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA.....	VI
POPIS OZNAKA	VII
SAŽETAK.....	IX
SUMMARY	X
1. Uvod.....	1
2. BUBANJ	4
2.1 Općenito o bubnjevima.....	4
2.2 Razvoj bubnjeva kroz povijest	6
2.3 Postupak proizvodnje	8
2.3.1 Metalne komponente	8
2.3.2 Polimerna membrana (glava bubnja)	8
2.3.3 Izrada stijenke (ljuske) bubnja	8
2.3.4 Sklapanje bubnja	9
2.3.5 Kontrola kvalitete	9
3. UPORABA VLAKANA PRIRODNOG PORIJEKLA	10
4. MORFOLOGIJA VLAKANA	13
5. MEHANIČKA SVOJSTVA	17
6. RASPORED VLAKANA U KOMPOZITIMA.....	21
7. POLIMERNE MATRICE	27
8. AKUSTIČNA SVOJSTVA.....	31
9. POSTUPCI PROIZVODNJE KOMPOZITA	36
9.1 Biokompoziti s plastomernom matricom	37
9.2 Biokompoziti s duromernom matricom.....	44
9.2.1 Slaganje u kalup	44
9.2.2 Podtlačno oblikovanje	45
9.2.3 RTM postupak.....	47
9.2.4 Pultrudiranje	48

9.2.5	Namotavanje filamenata.....	49
9.2.6	Autoklave	50
10.	EKSPERIMENTALNI DIO.....	52
10.1	Nabava lanenog preprega, kalupa i izrada probe	52
10.2	Izrada kompozitnog bubnja.....	55
10.3	Izrada epruveta i ispitivanje mehaničkih svojstava.....	68
10.3.1	Ispitivanje vlačne čvrstoće	69
10.3.2	Ispitivanje savojne čvrstoće	74
10.3.3	Ispitivanje žilavosti	79
10.3.4	Ispitivanje međuslojne čvrstoće	81
10.4	Ispitivanje akustičnih svojstava	82
11.	ZAKLJUČAK	86
	Literatura	87

POPIS SLIKA

Slika 1. Zastupljenost konopljinih i lanenih vlakana ovisno o naknadnoj uporabi [1]	2
Slika 2. Tom-tom 12 drveni bubanj	3
Slika 3. Snare bubanj [3]	5
Slika 4. Tenor bubanj [4]	5
Slika 5. Bas bubanj [5]	5
Slika 6. Stradivarijev timpani bubanj [6]	7
Slika 7. Dijelovi tam-tam bubnja [7]	10
Slika 8. Shematski prikaz lokacija vlakana unutar stabljika jednosupnica i dvosupnica [8] ...	11
Slika 9. Shematski prikaz lokacija vlakana unutar stabljika jednosupnica i dvosupnica [9] ...	12
Slika 10. SEM prikaz izdvojenog vlakna i snopa vlakana nakon mehaničke obrade[9]	13
Slika 11. Poprečni presjek snopa vlakana pojedinih sorti [9]	14
Slika 12. Utjecaj kuta mikrofibrila (MFA) na mehanička svojstva vlakana[10]	16
Slika 13. Utjecaj načina ispitivanja vlačne čvrstoće na dobivene rezultate [9]	17
Slika 14. SEM prikaz dislokacija [11]	19
Slika 15. Laminatni predoblici [13]	22
Slika 16. Način tkanja prediva [13]	23
Slika 17. Postupak pletenja u današnjoj industriji [13]	24
Slika 18. Neravnost vlakna [14]	25
Slika 19. Kut uvijanja vlakna [14]	26
Slika 20. Utjecaj stupnja uvijenosti vlakna na uspješnost impregnacije [14]	26
Slika 21. Vlačno napregnuta jednosmjerno orijentirana vlakna [15]	28
Slika 22. Prikaz loma vlakna uslijed jednosmjernog vlačnog opterećenja [15]	28
Slika 23. Prikaz loma kompozita uslijed opterećenja okomitog na smjer vlakana [15]	29
Slika 24. Prikaz uzdužnog tlačnog opterećenja [15]	30
Slika 25. Prikaz opterećenja pod određenim kutom [15]	30
Slika 26. Vlačno opterećen kompozit ojačan slučajno usmjerenim vlaknima [15]	31
Slika 27. Shema ispitivanja materijala izloženog longitudinalnim vibracijama [16]	32
Slika 28. Položaj rezonantnih čvorova [16]	33
Slika 29. Prikaz smanjenja amplitude vibracija kroz vrijeme [16]	35
Slika 30. Postupak miješenja [17]	39
Slika 31. Postupak ekstrudiranja [17]	40
Slika 32. Postupak proizvodnje plastomernog mata [17]	41

Slika 33. Postupak kompresijskog kalupljenja [17]	42
Slika 34. Postupak pultrudiranja [17].....	43
Slika 35. Postupak injekcijskog kalupljenja [17]	44
Slika 36. Slaganje u kalup [17]	45
Slika 37. Postupak podtlačnog oblikovanja [17].....	46
Slika 38. RTM postupak [17]	48
Slika 39. Postupak pultrudiranja [17].....	49
Slika 40. Namotavanje filamenata [17].....	50
Slika 41. Shema postupka u autoklavu [17].....	51
Slika 42. Laneni prepreg	53
Slika 43. Kalup od čeličnog lima	53
Slika 44. Provedeni postupak podtlačnog oblikovanja	54
Slika 45. Lom kompozitnog uzorka	55
Slika 46. Slojevi papira omotani oko kalupa.....	56
Slika 47. Izrezani slojevi od lanenog preprega.....	57
Slika 48. Postupak slaganja slojeva oko kalupa	57
Slika 49. Omotana tkanina za odjeljivanje (eng. peel ply).....	58
Slika 50. Omotana tkanina za upijanje prekomjerne smole	59
Slika 51. Kalup zabrtvljen PA folijom	59
Slika 52. Postupak vakumiranja	60
Slika 53. Polaganje omotanog kalupa u peć.....	60
Slika 54. Izbijanje kalupa	61
Slika 55. Dobivena stijenka od lanenog kompozita	61
Slika 56. Druga stijenka od lanenog kompozita.....	62
Slika 57. Slojevi kompozita napregnuti gumom i zabrtvljeni Al trakom.....	63
Slika 58. Oprema za podtlačno oblikovanje.....	64
Slika 59. Zabrtvljeni kalup u peći	64
Slika 60. Toplinski obrađena kompozitna stijenka	65
Slika 61. Skicirane i izbušene rupe	66
Slika 62. Premazana stijenka bubnja.....	67
Slika 63. Sklopljeni kompozitni bubanj	67
Slika 64. Izrezane epruvete	68
Slika 65. Kidalica na kojoj je izvršeno ispitivanje	70
Slika 66. Dijagram sila – produljenje za epruvetu 1	71

Slika 67. Dijagram sila – produljenje za epruvetu 2	72
Slika 68. Dijagram sila – produljenje za epruvetu 3	73
Slika 69. Trotočkasto ispitivanje na kidalici	75
Slika 70. Dijagram sila – progib za epruvetu 1	76
Slika 71. Dijagram sila – progib za epruvetu 2	77
Slika 72. Dijagram sila – progib za epruvetu 3	78
Slika 73. Ispitivanje žilavosti na Charpy-evom batu.....	79
Slika 74. Montirani mikrofoni na drvenom i kompozitnom bubnju	82
Slika 75. Oprema za mjerenje akustičnih svojstava	83
Slika 76. Podešavanje frekvencija drvenog i kompozitnog bubnja.....	84
Slika 77. Usporedba kompozitnog (Tom 1) i drvenog (Tom 2) bubnja.....	84

POPIS TABLICA

Tablica 1. Udio organskih tvari u vlaknima prirodnog porijekla [9]	12
Tablica 2. Duljina i promjer vlakana pojedinih sorti [9]	15
Tablica 3. Usporedba mehaničkih svojstava vlakana pojedinih sorti [9]	18
Tablica 4. Produljenja epruvete 1 pri statičkom vlačnom pokusu	71
Tablica 5. Produljenja epruvete 2 pri statičkom vlačnom pokusu	72
Tablica 6. Produljenja epruvete 3 pri statičkom vlačnom pokusu	73
Tablica 7. Dimenzije i mehanička svojstva pojedinih epruveta	74
Tablica 8. Progibi epruvete 1 pri opterećenju	76
Tablica 9. Progibi epruvete 2 pri opterećenju	77
Tablica 10. Progibi epruvete 3 pri opterećenju	78
Tablica 11. Dimenzije i mehanička svojstva pojedinih epruveta	79
Tablica 12. Rezultati ispitivanja udarnog rada loma	80
Tablica 13. Rezultati ispitivanja međuslojne čvrstoće	81

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
A_{cu}	kJ/m^2	udarni rad loma
α	$^\circ$	kut uvijanja vlakana
b	mm	širina ispitnog tijela
c	mm/mm	valovitost vlakna
D	mm	promjer snopa vlakana
E	N/mm^2	modul elastičnosti
E_c	J	energija loma
ε	mm/mm	istezanje
F_{max}	N	maksimalna sila opterećenja
F_P	N	prekidna sila
f	Hz	rezonantna frekvencija
h	mm	debljina ispitnog tijela
h	mm	visina snopa vlakana
K	-	akustični koeficijent
K	-	tenzor propusnosti medija
l	mm	duljina uzorka
L	mm	razmak između oslonaca
L_0	mm	početna duljina epruvete
ΔL	mm	produljenje
n	-	broj rezonantnih modaliteta
η	-	koeficijent viskoznosti tekućine
∇P	-	gradijent vektora tlaka
R_m	N/mm^2	vlačna čvrstoća
R_{ms}	N/mm^2	savojna čvrstoća
S_0	mm^2	površina početnog presjeka
V	mm^3	volumen
v	m/s	brzina zvuka u uzorku
v_v	m^3/kg	specifični volumen vlakna
λ	m	valna duljina
λ'	-	faktor smanjenja vibracija
ρ	g/cm^3	gustoća

$R_{m, k}$	N/mm ²	čvrstoća kompozita
$R_{m, m}$	N/mm ²	čvrstoća matrice
$R_{m, vl}$	N/mm ²	čvrstoća vlakna
η_{oE}	-	faktor orijentiranosti vlakna
η_{IE}	-	omjer dužina/promjer
$\tan \delta$	-	faktor prigušenja vibracija
τ	N/mm ²	međuslojna čvrstoća
Q	-	faktor kvalitete zvuka

SAŽETAK

Danas se na svjetskom tržištu pored već dobro znanih sintetskih vlakana javlja sve više biokompozita ojačanih najčešće vlaknima od lana, konoplje i jute. Sukladno tome osnivaju se novi istraživački programi čiji je zadatak prvenstveno konstantno poboljšanje svojstava biokompozita, te općenito povećanje funkcionalnosti i kompetitivnosti. Glavna prednost kompozita ojačanih prirodnim vlaknima u odnosu na sintetske kompozite vezana je uz održivi razvoj, pogotovo u slučaju upotrebe i matrice kompozitnog materijala prirodnog podrijetla. Uporabom bioloških i biorazgradivih komponenata za izradu kompozitnih materijala, nazvanih zeleni kompoziti, smanjuje se potrošnja energije vezana uz proizvodnju sintetskih vlakana i smola, smanjuje se nagomilavanje nerazgradivog kompozitnog otpada, potiče se razvoj poljoprivrede i općenito realizacija novih, alternativnih ideja. Uz navedene prednosti, kompozite ojačane prirodnim vlaknima karakterizira manja masa u odnosu na sintetske kompozite i vrlo dobra akustična svojstva. Iz tog je razloga u ovom radu izrađen prototip kompozitne stijenke bubnja ojačane lanenim vlaknima u biorazgradivom polimeru na bazi ulja iz ljuske indijskog orašića. Naknadno su izrađene epruvete, te su ispitana mehanička svojstva kompozitnog materijala. Zaključno su ispitana akustična svojstva u glazbenom studiju.

Ključne riječi: prirodna vlakna, lan, biorazgradiv zeleni kompozit, biokompozit, , mehanička svojstva, akustična svojstva

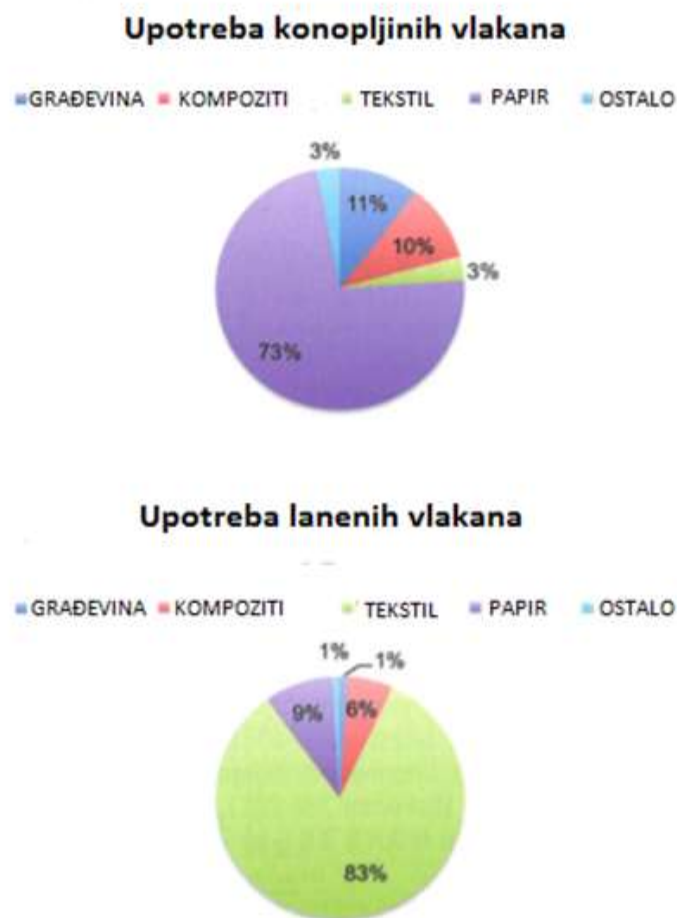
SUMMARY

Today, on the world market in addition to the well-known synthetic fibers, occur more and more composites reinforced with natural fibers such as flax, hemp and jute. According to this, new research programs are established with the task of a constant improvement of the properties of biocomposites, and a general incensement of functionality and competitiveness. The main advantage of composites reinforced with natural fibers compared to synthetic composites is related to sustainable development, especially in the case when some biodegradable composite matrix is used as well. The use of biofibers and biomatrices for the production of “green composites” reduces the energy consumption related to the production of synthetic fibers and resins, reduces the accumulation of non-degradable composite waste, promotes the development of agriculture in general and the implementation of new, alternative ideas. In addition to these advantages, composites reinforced with natural fibers are characterized by less weight compared to synthetic composites and very good acoustic properties. For this reason, in this paper the prototype of the drum shell reinforced with flax fibers in biodegradable cashew nut shell liquid (CNSL) polymer matrix is made. Afterwards, test tubes were made and mechanical properties of composite material were tested. In conclusion, acoustic properties were tested.

Key words: natural fibers, flax, biodegradable green composite, biocomposite, mechanical properties, acoustic properties

1. Uvod

Danas se na svjetskom tržištu pored već dobro znanih sintetskih vlakana (ugljična, staklena, aramidna i sl.) javlja sve više biokompozita ojačanih najčešće vlaknima od lana, konoplje i jute. Sukladno tome osnivaju se novi istraživački programi čiji je zadatak prvenstveno konstantno poboljšanje svojstava biokompozita te općenito povećanje funkcionalnosti i kompetitivnosti. Izazov je može se reći ne samo tehnološkog, nego i društvenog karaktera zato što je glavni zadatak uz poboljšanje mehaničkih, fizikalnih, kemijskih i ostalih svojstava isto tako i buđenje svijesti kod ljudi u smjeru održivog razvoja. Primjerice, mehanička svojstva kompozita ojačanog ugljičnim vlaknima u kombinaciji s epoksidnom smolom daleko su superiornija nad bilo kojim biokompozitom. S druge strane za njihovu proizvodnju (stabilizacija, karbonizacija, grafitizacija) troši se gotovo 25 puta više energije u usporedbi s obradom biovlakana. Isto tako nakon što vlakna odsluže svoj vijek trajanja iznimno ih je teško reciklirati. Kad se primjerice čelični automobil pokvari, iste čelične komponente mogu se rastaliti i ponovo primijeniti za izradu novog automobila ili neke građevine. Za recikliranje ugljičnih vlakana potrebno je potrošiti goleme količine energije te je bitno za naglasiti kako mehanička svojstva recikliranih vlakana neće biti ni približna kakva su bila u prvotnom stanju. Iz tog se razloga nakon recikliranja nikada ne upotrebljavaju kao materijal ojačala što dovodi do gomilanja, iako inertnog, kompozitnog otpada. Iz tog razloga, danas sve više znanstvenika i inženjera radi na razvoju "alternativnih" biokompozita. Zadnjih je godina na tržištu zabilježen značajan rast udjela biokompozita. Od 2010. godine kada ih je bilo 20 000 tona do današnjih 45 000 tona količina se i više nego udvostručila. Najviše su zastupljena vlakna od pamuka, no gotovo se i ne koriste kao ojačalo u kompozitima. Između prirodnih vlakana koja se koriste za ojačanje konstrukcije najzastupljenija su vlakna od jute, nakon čega slijede kokosova vlakna i lan. Vlakna od konoplje najmanje su zastupljena i na tržištu ih se nalazi tek 1/10 ukupne količine lanenih vlakana. Pogleda li se zastupljenost upotrebe lanenih i konopljinih vlakana u područjima proizvodnje zamjećuje se kako se lanena vlakna najviše koriste u tekstilnoj industriji (oko 83 %), dok se konoplja pretežno još uvijek najviše koristi kod proizvodnje papira. Što se kompozitne industrije tiče, tek 6 % svih lanenih i 10 % svih konopljinih vlakana na tržištu u toj grani proizvodnje nalazi svoju primjenu. Iz tog podatka direktno se vidi kako postoji značajan prostor za napredak. [1]



Slika 1. Zastupljenost konopljinih i lanenih vlakana ovisno o naknadnoj uporabi [1]

Razlog sve veće uporabe biokompozita može se naći u nekim osnovnim prednostima u usporedbi s klasičnim sintetskim kompozitima. Pored jednostavnijeg recikliranja slijede prednosti poput: manje mase, niže cijene, nižih troškova proizvodnje, biorazgradivosti, kao i estetski izgled (nalik drvu) koji je prihvatljiviji, te se iz tog razloga sve češće nalaze uporabu u automobilske industriji, zrakoplovnoj industriji, vojnoj industriji, medicini, sportske industriji, glazbenoj industriji, za ambalažu i sl. U pogledu mehaničkih svojstava karakterizira ih vrlo dobra specifična čvrstoća i specifična krutost. Razlog tome je bitno manja gustoća prirodnih vlakana u odnosu na sintetska vlakna. U pogledu morfologije prirodna vlakna imaju šuplju strukturu koja omogućuje odlično prigušenje energije vibracija i zvuka što ih čini više nego dobrim izolatorima od buke. O mehaničkim svojstvima, morfologiji vlakana, kao i o utjecajnim čimbenicima na pojedina svojstva više će biti rečeno u nastavku.

U ovom radu izradit će se i ispitati ideja izrade glazbenog instrumenta bubnja od zelenog kompozita ojačanog lanenim vlaknima. Obzirom na to da u glazbenoj industriji takva ideja još nije realizirana, postavlja se pitanje može li laneni kompozit u ulozi stijenke bubnja zamijeniti

već dugo korišteno drvo, metale ili poznate sintetske kompozite? Pri izradi bubnja do izražaja bi došla vrlo niska gustoća lanenih vlakana i odlično prigušenje vibracija. Upravo zbog tog razloga kompozit ojačan lanenim vlaknima mogao bi biti zamjena za drvo (najčešće javor i mahagonij), metale ili sintetske kompozite koji su danas široko rasprostranjeni u glazbenoj industriji.



Slika 2. Tom-tom 12 drveni bubanj

2. BUBANJ

2.1 Općenito o bubnjevima

Bubanj je glazbeni instrument koji proizvodi zvuk vibracijom napregnute membrane. Membrana, koja je još poznata pod nazivom glava bubnja, prekriva jedan ili najčešće dva kraja šupljeg tijela ili ljuske bubnja. Grupa instrumenata kod kojih se zvuk proizvodi vibriranjem membrane nazivaju se još i membranofoni. Bubnjevi općenito pripadaju u skupinu perkusijskih instrumenata i izrađuju se u više različitih oblika i veličina. Najčešći oblik šupljeg tijela jest cjevasti ili tradicionalni zdjelasti oblik. Cjevasti bubnjevi u osnovi se dijele ovisno o odnosu visine i širine. Tako je primjerice za bubnjeve konga karakteristično da im je visina veća u odnosu na širinu, dok je kod nekih tipova bubnja moguće da im je širina veća u odnosu na visinu. Kratki bubnjevi, poznati još pod nazivom plitki bubnjevi najuobičajeniji su tipovi cjevastih bubnjeva koji se danas koriste u suvremenoj glazbi. [2]

Bubnjevi se dijele u tri glavne podskupine:

- 1) Snare bubnjevi
- 2) Tenor bubnjevi
- 3) Bas bubnjevi

Zvuk se kod bubnjeva uglavnom proizvodi udaranjem ruke, drvenih udaraljki ili batova po napregnutoj membrani. U današnjoj suvremenoj glazbi kod većine bubnjeva zvuk se proizvodi udaranjem drvenih udaraljki. Kod nekih se bubnjeva u tradicionalnim nezapadnjačkim kulturama zvuk proizvodi i na druge načine osim udaranja po membrani. Rattle-bubnjevi sadrže sitne metalne kuglice unutar tijela ili zvončiće na vanjskoj strani koje je potrebno protresti da se dobije odgovarajući zvuk. Kod nekih se membranofona zvuk proizvodi titranjem membrane u skladu s proizvedenim zvučnim valovima od strane izvora (ljudski glas ili neki drugi instrument). Takvi instrumenti poznati su još pod nazivom militroni, a najpoznatiji predstavnik militrona je kazoo. [2]



Slika 3. Snare bubanj [3]



Slika 4. Tenor bubanj [4]



Slika 5. Bas bubanj [5]

2.2 Razvoj bubnjeva kroz povijest

Perkusijski instrumenti koriste se od davnina. Opće je poznato da su prvi bubnjevi bili izrađeni od rastegnute riblje ili reptilske kože oko šupljeg debla i zvuk se proizvodio udaranjem rukama. Daljnjim se razvojem reptilska i riblja koža zamijenila kožom domaćih i divljih životinja te se u to vrijeme prvi puta koriste štapovi i batovi za udaranje. Pored debla, koža se često puta navlačila na jame u zemlji kako bi se izradili veliki bubnjevi ili oko razno raznih lonaca u slučaju malih bubnjeva. Mnoge stare civilizacije koristile su bubnjeve prilikom ratovanja, pučkih fešti ili nekih drugih prigoda. Poznato je da su prvi bubnjevi u Europu stigli iz drevnog babilonskog carstva unazad 5000 godina. Grci i Rimljani su koristili najčešće cjevasto oblikovane bubnjeve s napregnutom životinjskom kožom. Nakon pada Rimskog Carstva u zapadnoj se Europi gubi tradicija bubnjanja za razliku od arapskog svijeta gdje se ona i dalje prakticirala. Stoljećima kasnije za vrijeme križarskih ratova Europljani se susreću ponovo s tradicionalnim bubnjevima. Iz arapske kulture preuzeti su tamburin, naker i tabor. Oko tradicionalnog tabora se najčešće rastezalo životinjsko crijevo kako bi se dodatno postigao „zveckasti“ zvuk. Veliki bubnjevi u obliku kotla u Europu dolaze s Bliskog istoka u 15. stoljeću. Kotlovi su se radili od bakra na koje je s gornje strane bila rastegnuta teleća koža i koristili su se za vojne pohode i posebne proslave. Prvi put se koriste u orkestralnoj muzici krajem 17. stoljeća. Danas poznati veliki cjevasti bubanj (bas bubanj) bio je slabo zastupljen u Europi sve do kraja 18. stoljeća. Snare bubanj i tenor bubanj primarno su se koristili u vojne svrhe sve do 19. stoljeća. Timpani bubanj postaje važan instrument u orkestralnoj muzici tijekom 19. stoljeća. Tijekom 80-ih 19. stoljeća godina razvijeni su uređaji koji su omogućili bubnjarima da brzo promijene melodiju bubnja i na taj način izvode kompleksnije melodije. Može se reći kako je zapravo najveći razvoj bubnjeva nastupio tijekom 50-ih godina prošlog stoljeća razvojem polimernih membrana iako su u to vrijeme neki bubnjari preferirali i dalje zvuk koji omogućava rastegnuta životinjska koža. Danas gotovo svaki ozbiljniji proizvođač bubnjeva koristi polimerne membrane, a ukoliko kupac želi kožu umjesto polimera postoji mogućnost narudžbe kod određenih proizvođača. Tijekom 20. stoljeća perkusijski instrumenti postali su važan i gotovo nezamjenjiv dio orkestralne i popularne komercijalne glazbe. Razvijeni su raznovrsni setovi bubnjeva ovisno o vrsti glazbe (jazz, rock, pop i sl.) [2]



Slika 6. Stradivarijev timpani bubanj [6]

Vrsta polimera od kojeg se proizvode današnje membrane za bubnjeve razlikuje se od proizvođača do proizvođača. To su uglavnom poliesteri, najčešće PET (polietilen tereftalat) poznati još pod nazivom Mylar. Glavne prednosti PET-a su otpornost na vlagu, toplinu, sunčevu svjetlost i mnoge kemikalije. Danas se PET dobiva iz kemijskih spojeva (naftnih derivata) etilen glikola i tereftalne kiseline. Šuplji cjevasti oblik (ljuska) najčešće se izrađuje od drva (javor, breza, topola) i metala (aluminij, mjed, bronca). Zadnjih 20-ak godina razvijaju se i kompozitni bubnjevi ojačani uglavnom ugljičnim vlaknima. Ostale komponente na bubnju (lagovi, vijci, pločice, matice, prsteni i sl.) izrađeni su od aluminija ili mjedi. Dobivaju se uglavnom postupkom lijevanja u male kalupe. Postoje također i alternativne izvedbe od drva ili polimera. Veliki stalak koji drži cijeli set bubnjeva na pozornici prilikom koncerta izrađen je uglavnom od čelika ili aluminija ovisno o proizvođaču. [2]

2.3 Postupak proizvodnje

2.3.1 Metalne komponente

Metalne komponente izrađuju se preciznim alatom za obradu odvajanjem čestica. Najčešće su to tokarilice, bušilice i glodalice. Drvene komponente režu se iz drvenih blokova na standardne dimenzije posebnim alatima, dok se polimerne komponente dobivaju uglavnom postupkom injekcijskog kalupljenja. Polimer se zagrijava do temperature tališta te se naknadno ubrizgava u kalup traženih dimenzija komponente. U tim uvjetima polimer skrućuje i na kraju se vadi gotovi dio iz kalupa. [2]

2.3.2 Polimerna membrana (glava bubnja)

Kao što je prethodno već spomenuto, materijal koji se koristi kod izrade membrane (glave) za bubanj je PET (Polietilen-tereftalat). PET je prethodno dobiven kombinacijom dimetil-tereftalata s etilen-glikolom. Naknadnim utjecajem topline polimer se rastali i zatim se hladi u napregnutom stanju između valjaka. Postupnim rastezanjem obratka utječe se na debljinu PET-filma ovisno o konstrukcijskim zahtjevima. Dodavanjem i kombiniranjem aditiva mogu se također dobiti tanki filmovi različitih boja. PET folija se po završetku izrade šalje proizvođaču bubnjeva namotana na velikim rolama ili valjcima, nakon čega se režu krugovi odgovarajućih dimenzija posebnim alatom za obradu odvajanjem čestica. Na samom kraju postupka izrade membrane (glave) bubnja, polimer se zagrijava na krajevima kako bi se izradilo hvatište za dva prstena. Unutarnji prsten najčešće se izrađuje od čelika, dok je materijal vanjskog prstena najčešće aluminij. Završena glava bubnja naknadno se skladišti sve do sklapanja gotovog bubnja. [2]

2.3.3 Izrada stijenke (ljuske) bubnja

Izrada stijenke bubnja bitno se razlikuje ovisno o polaznom materijalu. Danas se najčešće koriste metalne i drvene stijenke, dok su polimerne i kompozitne stijenke nešto rjeđe. Izrada metalnih stijenki uključuje lijevanje u kalupe i naknadnu OČ ovisno o postavljenim zahtjevima na odljevke. Polimerne stijenke danas se uglavnom izrađuju postupkom injekcijskog kalupljenja. Drvene stijenke uglavnom se izrađuju od velikih i tankih drvenih panela (listova) poznatijim još pod nazivom furnir. Listovi se posebnom obradom odvajaju iz debla i šalju proizvođaču bubnjeva. Debljina slojeva kreće se u rasponu od 0,3 do 6 mm. Naknadno se slojevi režu automatski reguliranim pilama na tražene dimenzije buduće stijenke,

te se skladište pri kontroliranoj temperaturi i vlažnosti zraka. Stijenka bubnja dobiva se međusobnim lijepljenjem slojeva (7-9 slojeva najčešće) i naknadnim polaganjem u metalni kalup traženih dimenzija. Rubovi stijenke se najčešće režu pod kutom od 45° tako da vanjski sloj bude najviši a unutarnji sloj najniži. Na taj način omogućeno je lakše i učinkovitije sklapanje glave bubnja. Na kraju postupka stijenka bubnja se podvrgava postupku pjeskarenja kako bi se postigla čista i glatka površina na koju se može dodati sloj dekorativnog polimera u različitim bojama. [2]

2.3.4 Sklapanje bubnja

Bušenje stijenke ovisno o dimenzijama i vrsti dodatnih metalnih komponenti (lagova) zadnji je korak nužan za sklapanje gotovog bubnja. Najčešće se izrađuju s 20, 24 ili 32 rupe, na koje se postavljaju „lagovi“. *Lag* je engleski naziv za fiksne matice pričvršćene na vanjski obod tijela bubnja, u koje se pričvršćuju natezni vijci za spajanje stijenke i glave bubnja i ugađanje bubnja (slika 7).

Svaki lag pokriva po 2 rupe i drži glavu bubnja zajedno s dugačkim metalnim vijcima na mjestu. Zatezanjem vijaka i postupnim naprezanjem membrane regulira se zvuk bubnja. U pravilu svaki bubnjar prije korištenja bubnja koristi poseban ključ kojim zateže ili otpušta membranu bubnja. [2]

2.3.5 Kontrola kvalitete

Pri kontroli kvalitete potrebno je obratiti pozornost na svaku komponentu. Nužno je da su komponente dimenzionirane u skladu sa zahtjevima kako bi završno sklapanje bubnja bilo uspješno. Polimerna glava i metalni obruči moraju svojim dimenzijama odgovarati stijenci bubnja. Rupe na stijenci bubnja moraju biti izbušene tako da se lagovi mogu učvrstiti i držati glavu bubnja nepomičnom. Potrebno je također obratiti pozornost i na estetski izgled vanjske površine bubnja. Svakom je bubnjaru bitan vanjski izgled bubnja i ukoliko su prisutne deformacije i greške na površini, stijenk u je potrebno zamijeniti. [2]

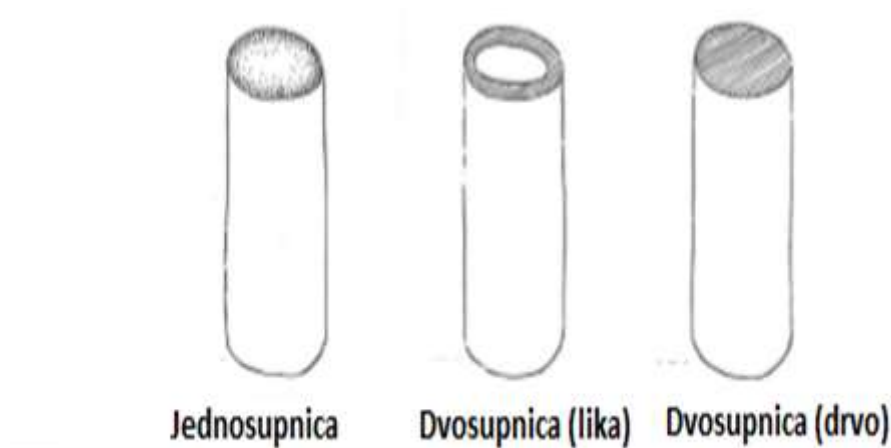


Slika 7. Dijelovi tam-tam bubnja [7]

3. UPORABA VLAKANA PRIRODNOG PORIJEKLA

Kako bi se uspješno primijenila vlakna prirodnog porijekla kao materijal ojačanja kompozitne konstrukcije potrebno je dobro poznavati prije svega osnovne prednosti i nedostatke te neka temeljna svojstva karakteristična za svaku grupu prirodnih vlakana. Vrsta vlakna, njegova morfologija, struktura i kemijski sastav u ovom slučaju imaju najvažniju ulogu u određivanju konačnih svojstava i karakteristika obrađenog vlakna. Drugi čimbenici kao što je primjerice način strojne obrade vlakana ili udio nepoželjnih kemijskih struktura u stabljikama također dolaze do izražaja. Oštećenje vlakna i prisutnost nepoželjnih faza u strukturi bitno određuju prije svega mehanička svojstva biokompozita. Danas se u prirodi može pronaći zaista velik broj vrsta biovlakana. Najpoznatija organska vlakna danas su pamuk, lan, konoplja, juta, kokosova vlakna, sisal i abaka. Svojstva i morfologija prirodnih vlakana bitno ovise o lokaciji vlakana u biljci kao i njihovoj biološkoj funkciji. Kao što se vidi na slici 8. vlakna se ovisno o vrsti biljke

nalaze u različitim pozicijama unutar stabljika. Pozicija vlakana je dakle uvjetovana jednosupnom ili dvosupnom strukturom unutar stabljika ili drveta. Bitan doprinos u pogledu mehaničkih svojstava kompozita daju takozvana likova vlakna kao što su lan, konoplja i juta. Ta vlakna se nalaze u vanjskom dijelu, točnije kori dvosupnih biljaka i osiguravaju čvrstoću i dimenzijsku stabilnost stabljike. Iz tog su razloga najbolji izbor prilikom izrade biokompozita i od posebnog su značaja. [8]

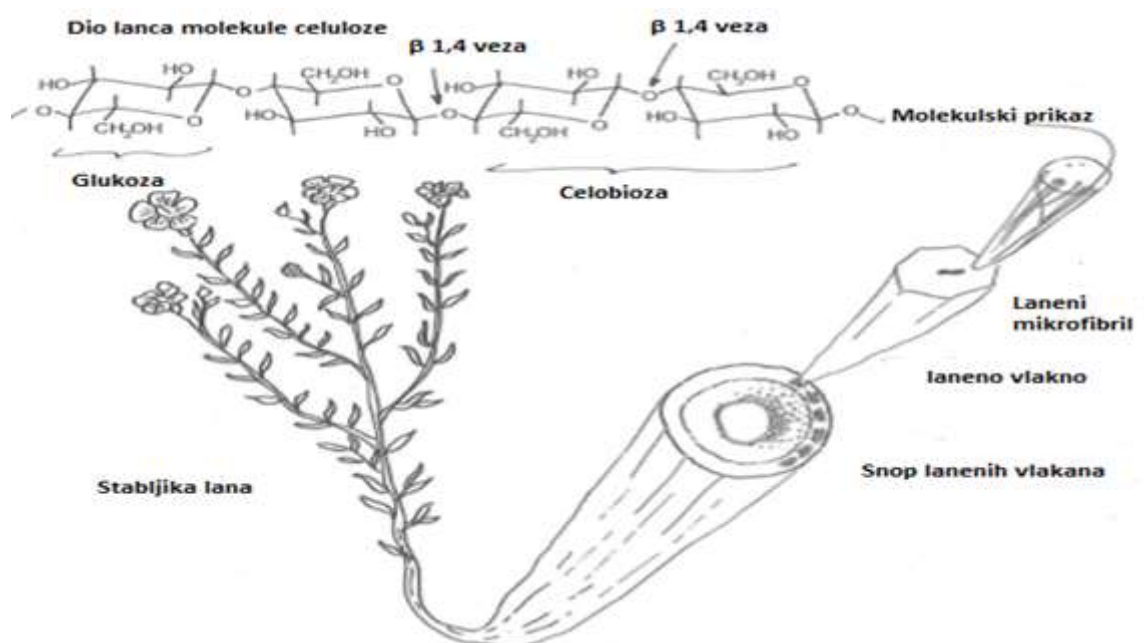


Slika 8. Shematski prikaz lokacija vlakana unutar stabljika jednosupnica i dvosupnica [8]

Što se kemijskog sastava tiče, prirodna vlakna se sastoje od molekula celuloze visoke čvrstoće i krutosti povezanih matricom lignina uz dodatak polisaharida, hemiceluloze i pektina. Uz prisutne komponente prisutan je bitno manji udio prirodnog ljepila (voska), anorganskih soli i dušikovih spojeva koji ne doprinose ojačanju strukture. Modul elastičnosti celuloze u vlaknima iznosi približno 135.000 MPa te je evidentno kako je celuloza najbitnija komponenta u osiguravanju traženih mehaničkih svojstava prirodnih vlakana. [9]

Tablica 1. Udio organskih tvari u vlaknima prirodnog porijekla [9]

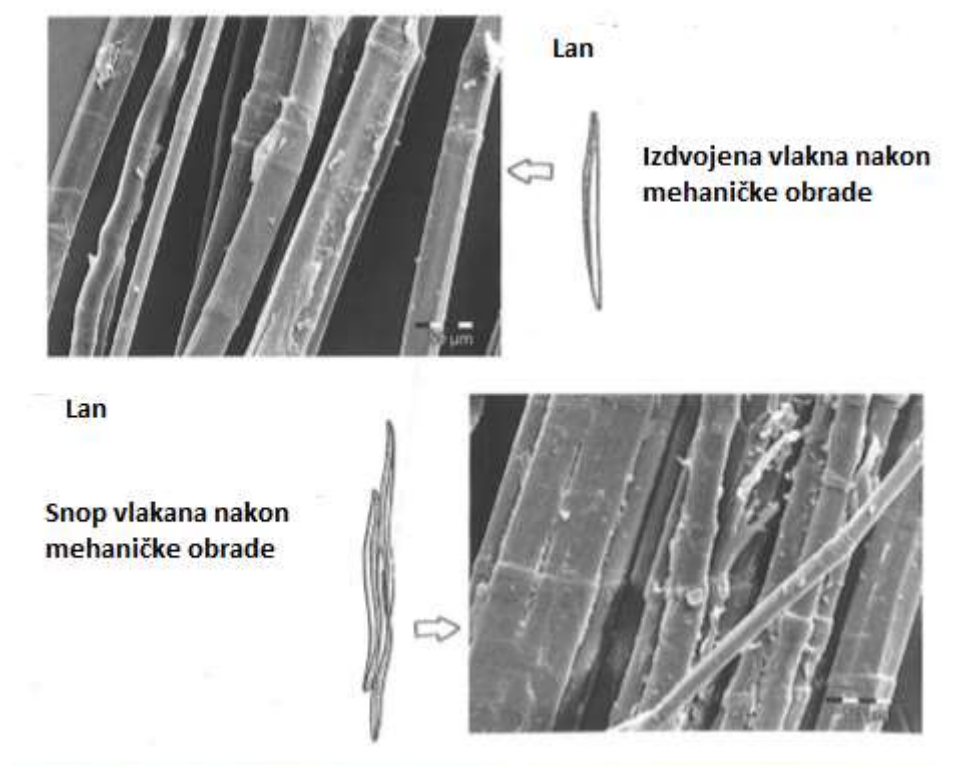
Tvari u %	Lan	Konoplja	Juta	Ramija	Sisal	Abaka	Kokos	Pamuk
Celuloza	70	70	65	72	66	60	40	90
Hemiceluloza	17	16	15	14	12	21	0,2	4
Lignin	2,5	6	10	0,7	10	10	43	0,7
Pektin	2	1	1,5	2	2	0,8	3	4
Vosak	1,5	0,7	0,5	0,3	1	1,4	0	0,6
Pepeo	1,5	1,5	0,4	0,3	0,3	0	0	1,4
Vodene otopine	6	1	1	6	3,5	1,4	4,5	0,7


Slika 9. Shematski prikaz lokacija vlakana unutar stabljika jednosupnica i dvosupnica [9]

U tablici 1. prikazano je kako vlakna konoplje, lana i jute imaju najveći udio celuloze, hemiceluloze i prirodne matrice lignina što ih čini prikladnim ojačanjem biokompozita. [9]

4. MORFOLOGIJA VLAKANA

Kao što je prije već spomenuto, prilikom ekstrakcije vlakana iz stabljike konoplje ili lana moguće je u potpunosti izdvojiti vlakna od tkiva stabljike ili u obliku snopa. Danas se najviše koriste vlakna izdvojena iz stabljika u obliku snopa, najčešće u kompozitnoj industriji, za izradu užadi ili tekstilnoj industriji. Dimenzije snopova vlakana variraju, kao npr. od nekoliko centimetara pa sve do jednog metra dužine, te od nekoliko desetaka mikrometara pa sve do jednog milimetra debljine. Snopovi vlakana sastoje se od nekoliko ili većeg broja individualnih vlakana spojenih raznim polimernim tvarima prirodnog porijekla. Svako pojedino vlakno isto tako može dimenzijski varirati, ali je u usporedbi sa snopom vlakana bitno manje. Na slici 9. vidljiva je razlika snopa vlakana u usporedbi s individualnim vlaknima. Vidi se kako su individualna vlakna pravilnijeg oblika i manjih dimenzija. [9]



Slika 10. SEM prikaz izdvojenog vlakna i snopa vlakana nakon mehaničke obrade[9]

Poprečni presjek

Kada se obrati pozornost na poprečni presjek različitih vrsta prirodnih vlakana mogu se jasno primijetiti razlike. Na slici 11. shematski je prikazan poprečni presjek snopa vlakana od pamuka, kokosa, lana i konoplje. Morfologija navedenih vlakana bitno se razlikuje i veoma dobro se može vidjeti kako se svaki snop sastoji od velikog broja vlakana od kojih je svako pojedinačno vlakno prikazano kao dugačka cjevčica gdje ćelijasta ljuska okružuje središnji prostor poznatiji još pod nazivom lumen. [9]



Slika 11. Poprečni presjek snopa vlakana pojedinih sorti [9]

Duljina i debljina vlakana pojedinih sorti

Kao što se morfološki razlikuju vlakna pojedinih sorti, isto tako se i dimenzijski razlikuju (duljina i debljina). Kao što se vidi u tablici 2. duljina i debljina pojedinih vlakana ili snopa razlikuje se ovisno o sorti. Konoplju, lan, ramiju i jutu karakteriziraju dugi snopovi vlakana (dulji od 10 cm pa sve do 5 m) relativno malih promjera. Takve karakteristike bitno olakšavaju naknadne procese pređenja i izrade pletiva, koja naknadno mogu služiti kao ojačanja kompozitnih konstrukcija. Također, duge i tanke snopove spomenutih vrsta karakterizira povoljan omjer duljine i širine što je vrlo važan čimbenik ojačanja kompozita.

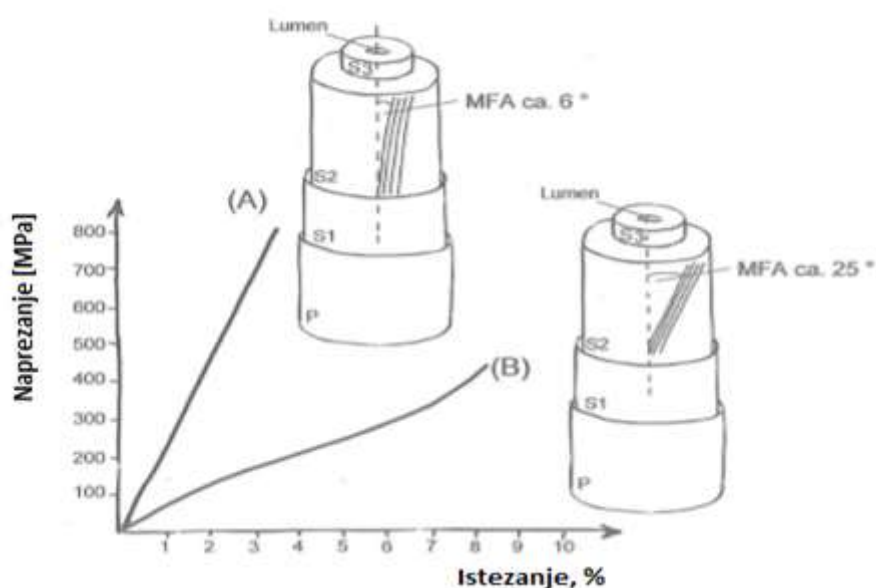
Tablica 2. Duljina i promjer vlakana pojedinih sorti [9]

Vrsta vlakana	Duljina	Promjer
Konoplja	650-5000 mm	25-500 μm
Juta	150-3600 mm	25-200 μm
Abaka	60-2500 mm	10-1000 μm
Ramija	800-2000 mm	16-904 μm
Lan	100-1500 mm	40-620 μm
Sisal	40-1250 mm	9-460 μm
Kokos	36-330 mm	50-460 μm

Struktura i svojstva stanične stijenke

Struktura stanične stijenke vlakana analogna je laminatnoj strukturi kompozita ojačanog sintetičkim vlaknima. Raspored mikrofibrila u staničnoj stijenci iznimno je složen i bitno određuje naknadna svojstva vlakana. Na slici 12. prikazan je raspored staničnih stijenki prirodnih vlakana koja karakteriziraju različiti kutovi mikrofibrila unutar stanične stijenke, poznatijih još pod nazivom MFA od engl. *microfibril angle*. Stijenka se zapravo sastoji od primarne stijenke (P) i sekundarne stijenke (S) koja se još dijeli na tri sloja: S1, S2 i S3. Vrlo tanka primarna stijenka nalazi se na rubnom području vlakna i susjedna je središnjoj lameli, odnosno intersticijskom prostoru između pojedinih vlakana unutar snopa i sastoji se od slučajno raspoređenih mikrofibrila. Središnja lamela sadrži vezivo koje povezuje vlakna unutar snopa. Primjerice u drvu, središnja lamela sastoji se uglavnom od lignina, dok se primjerice kod lana ona uglavnom sastoji od pektina. Kod konoplje postoje obje supstance, lignin i pektin. U

vanjskom i unutarnjem sloju sekundarne stijenke S1 i S3 mikrofibrili formiraju dva tipa spirala: desno orijentirani “Z tip” i lijevo orijentirani “S tip” spirala. Mikrofibrili u središnjem sloju S2 koji formiraju glavni dio sekundarne stijenke raspoređeni su međusobno paralelno unutar blago nagnute spirale. Kako je središnji sloj S2 ujedno i najveći unutar stanične stijenke dolazi se do zaključka kako MFA između mikrofibrila i središnje uzdužne osi u ovom sloju bitno utječe na vlačnu čvrstoću vlakana. Kao što se vidi na slici 12., povećanje kuta između mikrofibrila sa 6° na 25° uzrokuje značajno smanjuje aksijalnu vlačnu čvrstoću. Kod konopljinih i lanenih vlakana MFA je relativno mali (do 10°), te se u tom slučaju čvrstoća i krutost molekula celuloze uspješno može prenositi na vlakna. Uz to, konopljina i lanena vlakna sadrže veliki udio celuloze koja je, kao što je prethodno već spomenuto, glavni utjecajni čimbenik na mehanička svojstva vlakana. Kombinacijom tih dviju karakteristika kao što su MFA i udio celuloze uz dodatak kompatibilne plastomerne ili duromerne smole u potpunosti se određuju mehanička svojstva budućeg biokompozita. [10]



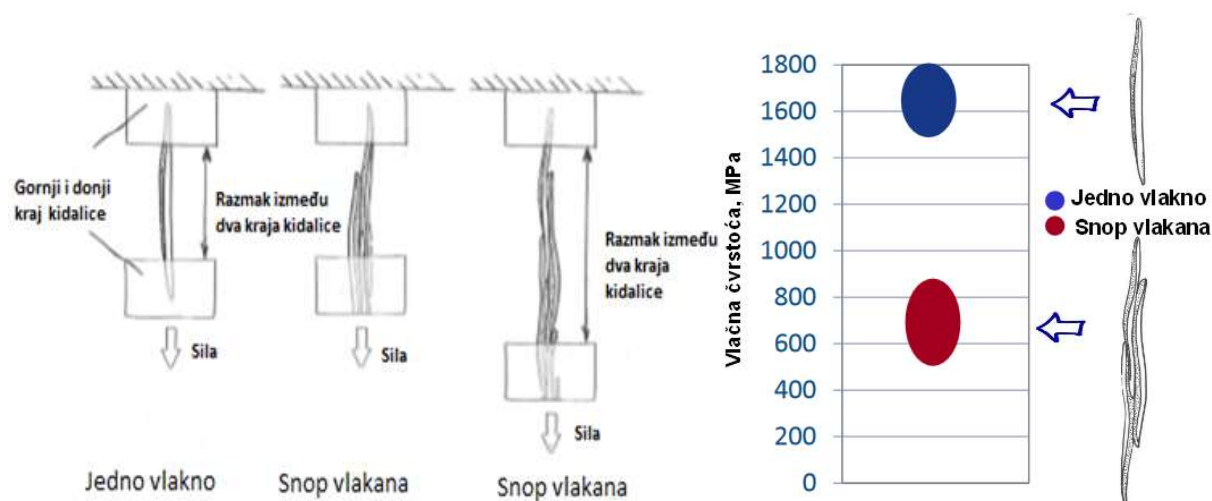
Slika 12. Utjecaj kuta mikrofibrila (MFA) na mehanička svojstva vlakana[10]

5. MEHANIČKA SVOJSTVA

Morfološke, kemijske i mikrostrukturalne karakteristike kao što je prethodno već spomenuto, bitno utječu na mehanička svojstva vlakana i snopa vlakana. Svojstva vlakna će isto tako naknadno utjecati na svojstva kompozita. Međutim, mjerenje mehaničkih svojstava vlakana ili snopa vlakana nije nimalo lagan postupak. Kako bi se što bolje razumjela i što točnije interpretirala mehanička svojstva biovlakana, bitno je obratiti pozornost na sljedeće vrlo važne faktore:

- 1) Brzina ispitivanja
- 2) Promjer vlakna
- 3) Razmak između čeljusti kidalice
- 4) Broj ispitnih tijela (uzoraka)
- 5) Entitet vlakna

Na slici 13. shematski je prikazano kako različiti rezultati mjerenja vlačne čvrstoće mogu proizaći prilikom testiranja individualnog vlakna ili snopa vlakana. [9]



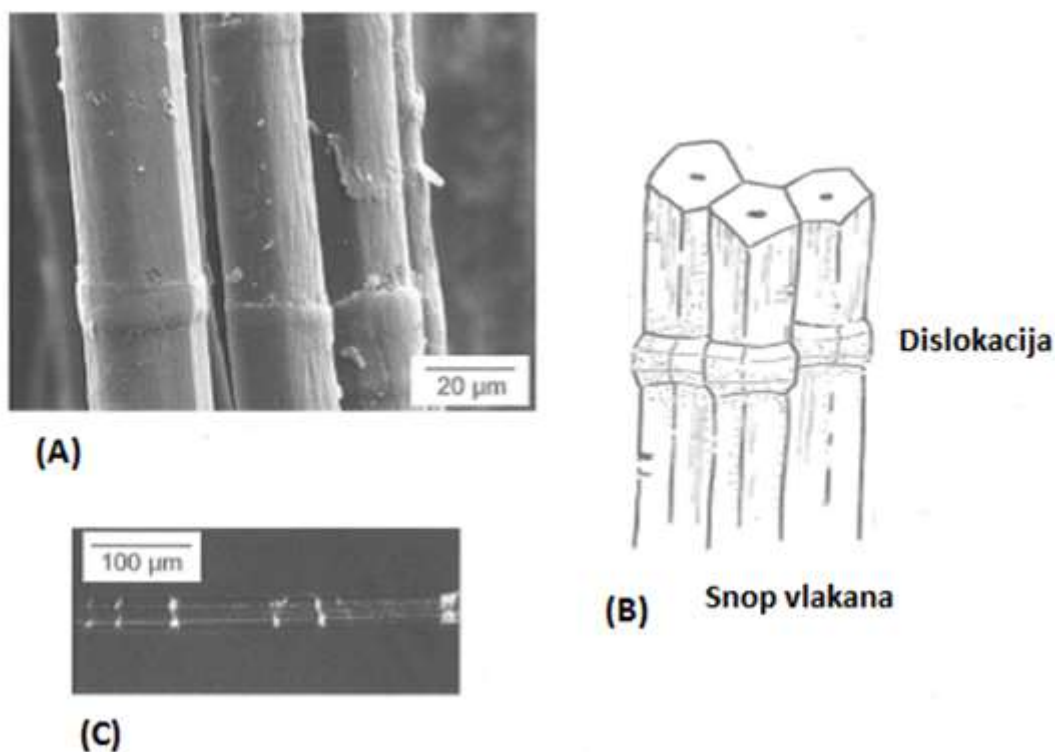
Slika 13. Utjecaj načina ispitivanja vlačne čvrstoće na dobivene rezultate [9]

U tablici 2. dana je usporedba mehaničkih svojstava vlakana ovisno o pojedinoj sorti.

Tablica 3. Usporedba mehaničkih svojstava vlakana pojedinih sorti [9]

Svojstva	Lan	Konoplja	Juta	Ramija	Sisal	Abaka	Kokos	Pamuk
Vlačna čvrstoća [MPa]	700	800	500	800	600	600	200	450
Modul elastičnosti [GPa]	70	65	30	65	12	50	5	8
Istezljivost, %	3	3	1,8	3	3	4	30	8
MFA, °	5-10	2-6	7-10	7-10	10-25	10-12	30-49	20-30
Gustoća [g/cm ³]	1,4-1,5	1,4-1,6	1,3-1,5	1,5-1,6	1-1,5	1,4-1,5	1,1-1,5	1,5-1,6

Bitno je za naglasiti da se vrlo dobar teoretski početni potencijal prirodnih vlakana u pogledu mehaničkih svojstava u praksi gotovo nikada ne realizira. Vlakna se vrlo često oštete prilikom mehaničke obrade nakon berbe te se iz tog razloga zbog nastalih dislokacija u strukturi vrijednosti mehaničkih svojstva snižavaju. Nastale dislokacije mogu se dobro vidjeti na slici 14. Mikroskopskim prikazom vidljivo je da prisutne dislokacije mogu bitno smanjiti vlačnu čvrstoću i krutost vlakana. U kompozitu s polimernom matricom prisutne dislokacije na vlaknima postaju potencijalni koncentratori naprezanja, koja naknadno mogu propagirati preko dodirnog područja vlakna i smole (sučelja) do rubnog područja te tako uzrokovati smanjenje prvenstveno čvrstoće i krutosti, te na koncu i lom kompozita. [11]



Slika 14. SEM prikaz dislokacija [11]

Drugi vrlo važan utjecajni faktor pored dislokacija je vlaga. Prisutne hidroksilne skupine (OH⁻) u strukturi stanične stijenke sklone su vezanju s molekulama vode. Hidroksilne skupine unutar kristalno strukturirane celulozne jezgre osiguravaju vezanje atoma vodika te im je glavni zadatak da održavaju kristalnu strukturu i osiguravaju kemijsku stabilnost. Međutim, kako su OH-skupine zadužene za inter- i intra-molekularno vezanje vodika, isto tako onemogućene su prilikom vezanja preostalih molekula vode. Molekule vode naknadno se adsorbiraju u prisutne polimerne faze unutar stanične stijenke te ona biva zasićena vodom što dovodi do taloženja vode u lumenu (praznom prostoru). Takva voda u strukturi još se naziva i “slobodna” voda, dok se voda unutar stanične stijenke naziva “vezana” voda. Udio vlage u prirodnom vlaknu izračunava se preko omjera mase vode unutar vlakna i mase potpuno dehidratiziranog i u peći osušenog vlakna. Ukoliko se vlakna izlože određenoj temperaturi i relativnoj vlažnosti zraka, uspostaviti će ravnotežni i proporcionalan udio vlage ovisno o spomenutoj temperaturi i vlažnosti zraka. Dakle, ukoliko je relativna vlažnost zraka niska, sukladno tome će biti nizak udio vlage u vlaknu i obrnuto. Smanjenje udjela vlage unutar vlakana rezultirat će skupljanjem dok će povećanje rezultirati bubrenjem vlakana. Upravo je iz tog razloga problematično kada dolazi do povećanja relativne vlažnosti zraka iz razloga što vlakno unutar kompozita mijenja

svoju početnu dimenziju te tako uzrokuje pojavu naprezanja međufaze vlakno-matrica. Takva pojava može dovesti do odvajanja vlakna od matrice ako adhezijske sile između vlakna i matrice nisu dovoljno jake. Drugi vrlo nepovoljan utjecaj vlage jest taj što uzrokuje biodegradaciju vlakana pod utjecajem gljivica ili bakterija. Uslijed biološke degradacije mehanička svojstva (vlačna čvrstoća, modul elastičnosti) bitno se pogoršavaju. Kako bi se smanjio nepovoljan utjecaj vlage u pogledu dimenzijske stabilnosti, smanjene biološke degradacije i bolje adhezije vlakno-matrica, danas se vlakna često puta kemijski ili fizikalno modificiraju. Modificirana vlakna prikladnije su ojačanje kompozitnih konstrukcija. [11]

Veza između vlakna i polimerne matrice

Uz prethodno navedene utjecajne čimbenike na mehanička svojstva kao što su vrsta vlakna, morfologija, struktura i kemijski sastav, od iznimne je važnosti i kvaliteta veze između vlakna i matrice. Svojstva kompozita prvenstveno se temelje na međudjelovanju ojačala i matrice te je u tom slučaju od esencijalne važnosti međufaza vlakno-matrica. Međufaza je sama po sebi trodimenzionalne heterogene strukture i predstavlja tranzicijsku zonu između vlakna i matrice. Proteže se od rubnog područja vlakna pa sve do homogene strukture smole. Optimizacija međufaze iz tog je razloga od iznimne važnosti prilikom izrade kompozita zahtijevanih mehaničkih svojstava. Primjerice, kod izrade kompozita ojačanog jutenim vlaknima u kombinaciji s polipropilenom (PP) u ulozi plastomerne matrice, nužno je koristiti takozvane kompatibilizatore faze s ciljem što boljeg nastanka kemijskih veza između polarnog vlakna i nepolarne PP-smole. Utvrđeno je da dodatak od 2 % masenog udjela kompatibilizatora u PP-matrici značajno poboljšava međufazu u odnosu s jutenim vlaknima te uzrokuje porast modula elastičnosti i vlačne čvrstoće kompozita. Kao kompatibilizator u ovom slučaju se upotrijebio cijepljeni anhidrid polipropilena (MAHgPP). Do poboljšanja adhezivnosti vlakno-matrica dolazi zbog interakcije anhidridne grupe kompatibilizatora s hidrofilnom površinom vlakna. Iz tog razloga polipropilenski lanac može reagirati s polipropilenskom matricom. Kod lanenih vlakana u kombinaciji s PP-matricom zabilježeno je također znatno poboljšanje adhezivnosti vlakno-matrica dodatkom MAHgPP kompatibilizatora. [12]

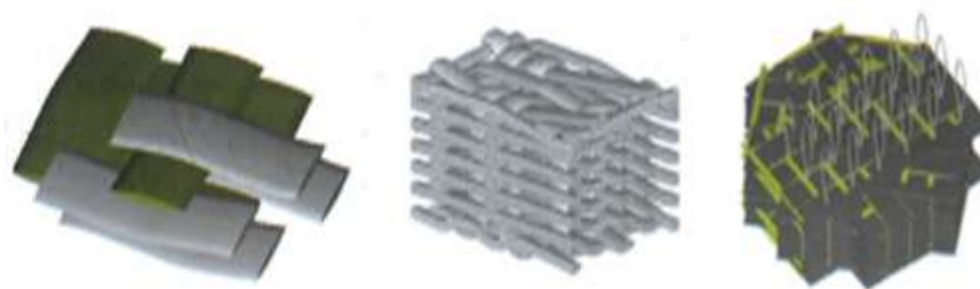
Zaključno, što se tiče uloge biovlakana u kompozitu, može se reći kako imaju svjetlu budućnost i veliki prostor za napredak na svjetskom kompozitnom tržištu. Kako bi se što bolje iskoristio potencijal i određene prednosti biovlakana bitno je obratiti pozornost na sljedeće:

- 1) Optimizirana i pažljivija strojna obrada stabljika nakon berbe u svrhu smanjenja mogućnosti nastanka dislokacija u strukturi i osiguranja što je moguće boljih mehaničkih svojstava.
- 2) Optimizirano i pažljivo rukovanje prilikom izrade kompozita kako bi se vlakna što je moguće više zaštitila od potencijalne termalne degradacije.
- 3) Poboljšanje adhezivnosti vlakno-matrica (međufaza).
- 4) Obratiti pozornost na norme prilikom ispitivanja u svrhe što boljeg tumačenja dobivenih rezultata.
- 5) Razvoj i realizacija simulacijskih modela u svrhu što boljeg razumijevanja utjecaja mehaničke obrade i varijacija unutar strukture različitih tipova biovlakana.

6. RASPORED VLAKANA U KOMPOZITIMA

Laminatni predoblici

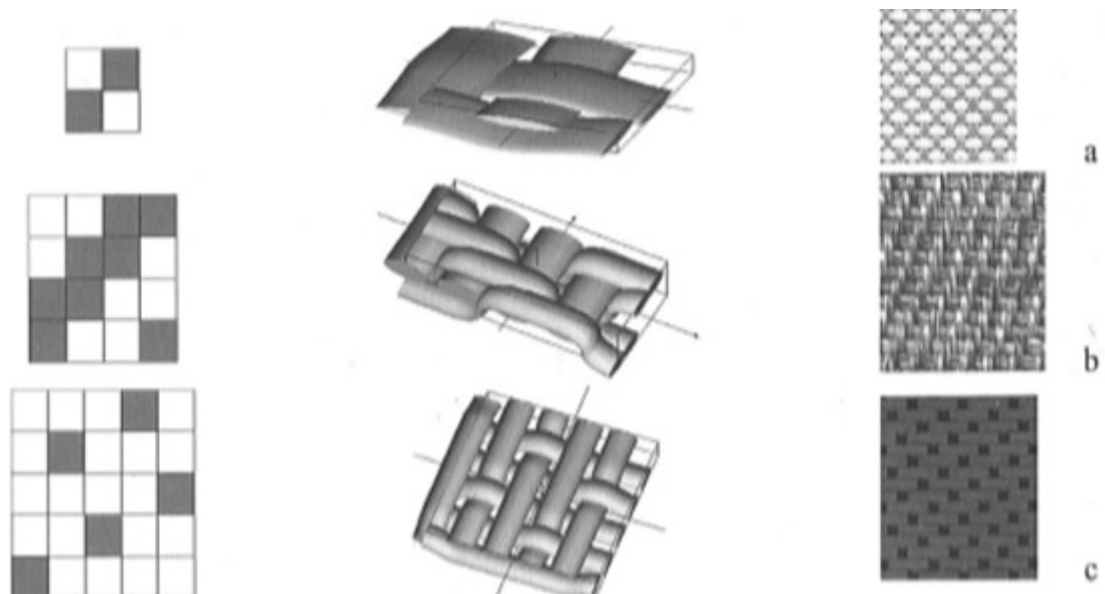
U ovom poglavlju bit će rečeno nešto više o rasporedu vlakana u kompozitima. Način pletenja i slaganja vlakana (arhitektura) prilikom izrade kompozita od presudne je važnosti. Tekstilna ojačanja mogu biti dvodimenzionalna (2D) ili trodimenzionalna (3D). Ojačanja se definiraju kao 2D ako imaju samo plošno raspoređena prediva i iz tog su razloga tanka. Najčešće su to laminatni predoblici. Ojačanja se definiraju kao 3D ako postoji bilo kakav raspored prediva u smjeru debljine te se integritet tekstilnih ojačanja održava predivom čiji smjer bitno odstupa od početne 2D ravnine. Tako prošivena vlakna obično su dovoljne debljine za izradu jednoslojnog kompozita. (slika 15.) [13]



Slika 15. Laminatni predoblici [13]

Tkani predoblici

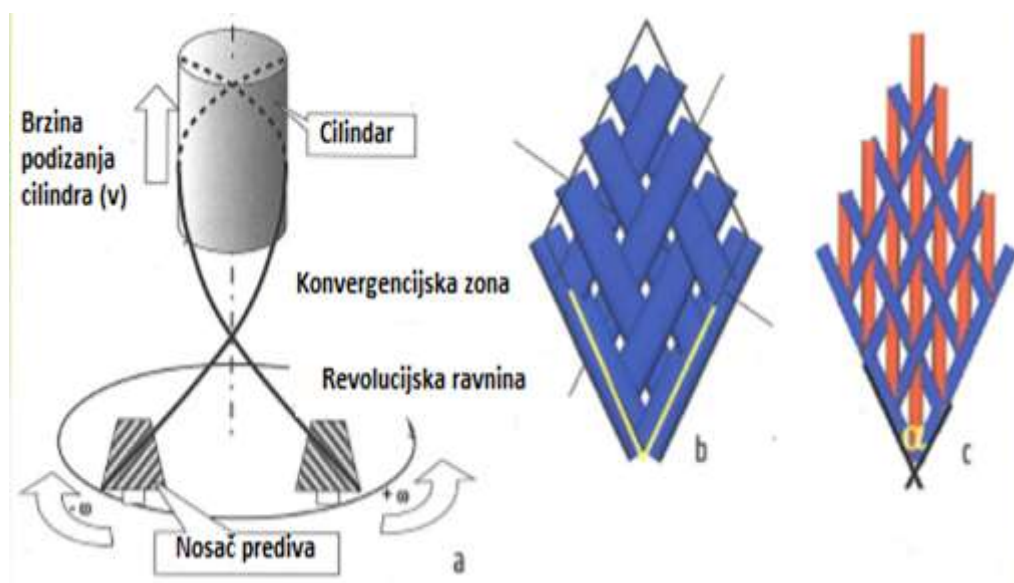
Tkani tekstil izrađuje se prepletanjem dvaju ortogonalnih namotaja vlakana. Shema ponavljanja prepletanja vlakana najbolje se vidi na slici 16. gdje stupci i redci predstavljaju uzdužna i poprečna vlakna. Ako je kvadrat crne boje, to znači da uzdužno vlakno prolazi iznad poprečnog vlakna. S druge strane, ako je kvadrat bijele boje, to znači da poprečno vlakno prolazi iznad uzdužnog vlakna. Na slici 16. su isto tako prikazani oblici tkanja koji se danas najviše koriste u kompozitnoj industriji. [13]



Slika 16. Način tkanja prediva [13]

Pleteni predoblici

Pletenje je postupak prepletanja tri ili više vlakana na takav način da se međusobno isprepliću u dijagonalnoj formaciji, što se najbolje vidi na slici 17. Najvažniji parametar kod ovog postupka je kut između namatanih vlakana dvaju nezavisnih sistema. Ukoliko se koristi 3D vreteno s različitim promjerima presjeka, potrebno je obratiti pozornost na brzinu podizanja i spuštanja vretena kako bi se održala ujednačenost kuta između namatanih vlakana. Podešavanjem brzine podizanja i spuštanja vretena i obodne brzine dvaju nezavisnih namota vlakana, moguće je postići različite vrijednosti krutosti i čvrstoće budućeg kompozita, ovisno o prethodno postavljenim zahtjevima. Danas u proizvodnji, kut namotanih vlakana može varirati od 20° do 160° . [13]



Slika 17. Postupak pletenja u današnjoj industriji [13]

Utjecaj neravnosti vlakana na mehanička svojstva kompozita

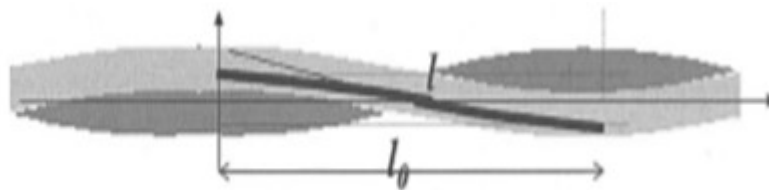
Unutarnja struktura, odnosno arhitektura vlaknastih ojačanja bitno utječe na buduće performanse gotovog kompozita. Kad se primijeni određeno opterećenje na kompozit, nastala lokalna opterećenja i deformacije ovisit će uvelike o međudjelovanju susjednih vlakana i matrice. Prema tome, lokalna neravnost („kovrčavost“) vlakana će isto tako preko susjednih područja bitno utjecati na ponašanje kompozita na globalnom nivou i o njoj će uvelike ovisiti nastanak eventualnih pukotina i njihovo naknadno širenje kroz strukturu. [14]

Neravnost vlakana određena je jednačbom: $c = (l - l_0)/l_0$ (1)

Gdje je: l - duljina vlakna unutar jedinične ćelije [mm]

l_0 – udaljenost između dva kraja vlakna [mm]

Neravnost je dakle uzročno-posljedično povezana s nagibom vlakna koji je jedan od glavnih uzroka smanjenja krutosti i čvrstoće strukture.



Slika 18. Neravnost vlakna [14]

Utjecaj uvijanja vlakana na mehanička svojstva kompozita

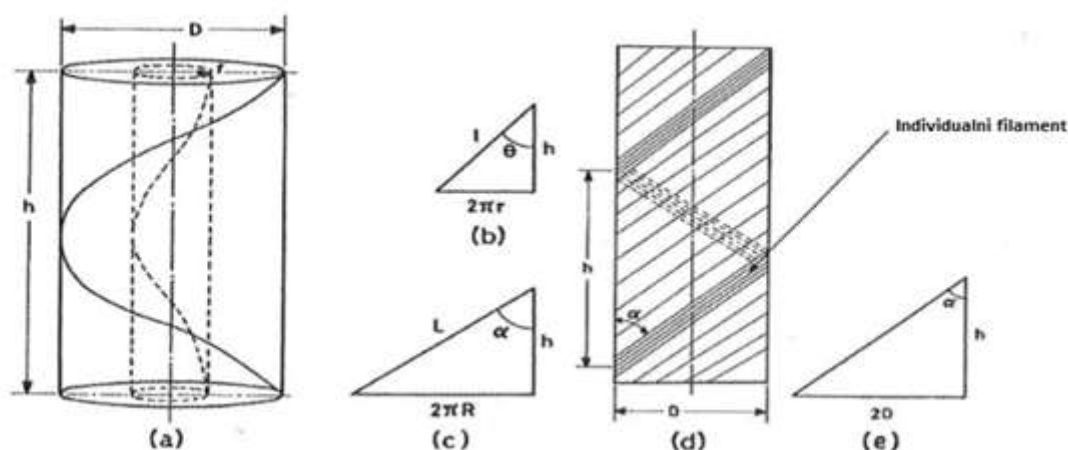
Usporede li se primjerice prirodna vlakna od konoplje ili lana sa sintetskim vlaknima, vidi se kako su prirodna vlakna ograničene duljine. Prilikom pređenja, vlakna se uvijaju kako bi proizvedeno predivo kao snop vlakana bilo što čvršće. Međusobnim uvijanjem vlakana postiže se viša čvrstoća kompozita zbog povećanog trenja i međusobnog preplitanja vlakana. Negativna strana u ovom slučaju je smanjena krutost kompozita kao posljedica smanjenja uzdužnog stupnja orijentiranosti vlakana. Takav raspored vlakana odstupa pod određenim kutom od referentne uzdužne osi. Danas se utjecaj uvijanja vlakana na krutost kompozita izražava preko kuta uvijanja α i broja zaokreta vlakana unutar jednog metra. Kut uvijanja definiran je kao kut kojeg vlakna unutar jednog snopa zatvaraju u odnosu na središnju uzdužnu os, što se može vidjeti na slici 19. Kut uvijanja danas se izračunava preko jednadžbe: [14]

$$\tan \alpha = \frac{D\pi}{h} \quad (2)$$

gdje je: α – kut uvijanja vlakana, °

D – promjer snopa vlakana, mm

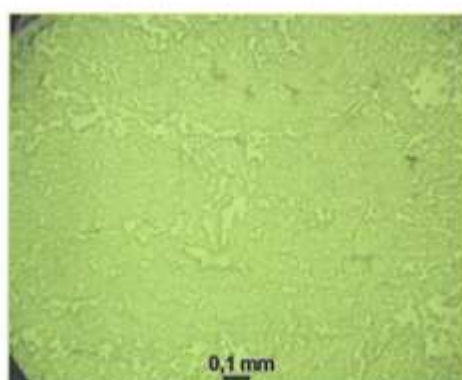
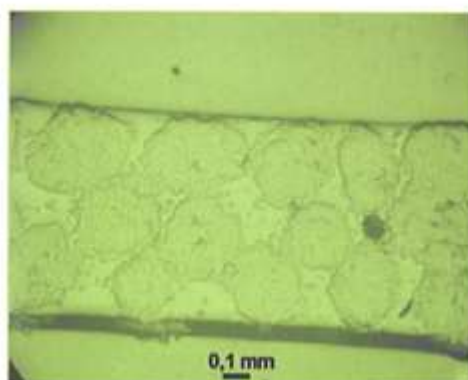
h – visina snopa vlakana, mm



Slika 19. Kut uvijanja vlakna [14]

Utjecaj uvijanja vlakana na impregnaciju kompozita

Pored utjecaja na mehanička svojstva kompozita, uvijanje bitno utječe i na kvalitetu impregnacije vlakana smolom. Ukoliko su vlakna više uvijena, bit će ih teže impregnirati sa smolom zbog zbijenosti strukture i manjeg broja mikrošupljina. U slučaju manjeg stupnja uvijenosti vlakana impregnacija vlakana smolom bit će bolja zbog manje zbijenosti i većeg broja mikrošupljina. Nakon impregnacije ova su vlakna pod mikroskopom teško prepoznatljiva za razliku od vlakana višeg stupnja uvijenosti kod kojih se jasno vidi cilindričan oblik. Iz ovog se jasno može zaključiti kako su vlakna manjeg stupnja uvijenosti bolje natopljena smolom te da takva impregnacija pozitivno utječe na mehanička svojstva kompozita. [14]



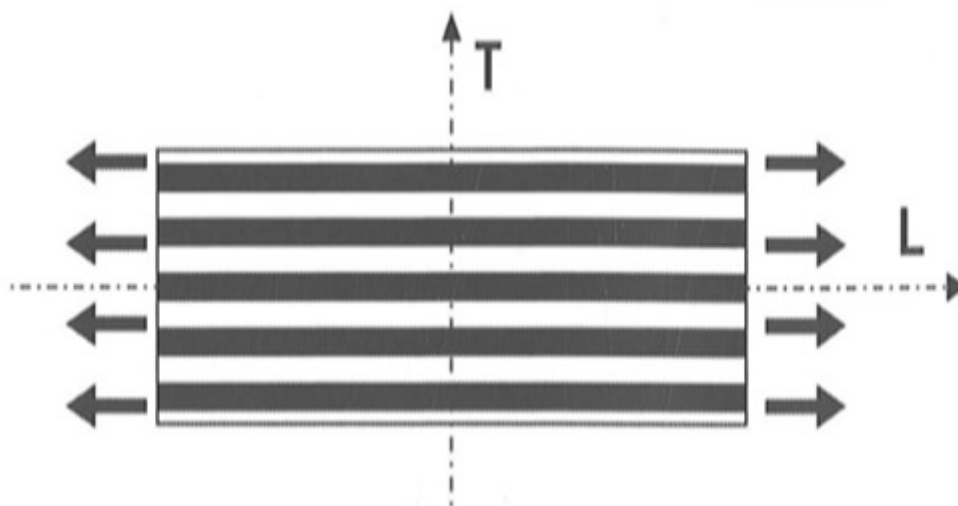
Slika 20. Utjecaj stupnja uvijenosti vlakna na uspješnost impregnacije [14]

7. POLIMERNE MATRICE

Matrica je uz vlakna jednako bitna komponenta u pogledu osiguranja adekvatnih mehaničkih svojstava kompozitnog materijala. Danas se kompozitne matrice dijele na polimerne, keramičke i metalne. Što se tiče kompozita ojačanih prirodnim vlaknima od najvećeg je značaja polimerna matrica koja se daleko najviše koristi. Definicija kompozita kao isključivo kombinacije vlakana i smole može se reći da nije u potpunosti ispravna s obzirom da jednako važnu ulogu igra i međufaza između vlakana i matrice. Kvaliteta međufaze osigurava prijenos opterećenja između matrice i vlakana, te o njoj isto tako ovisi i kohezivnost kompozita. O kvaliteti međufaze isto tako jako ovise mehanička svojstva i trajnost kompozita, osobito u vlažnim medijima. [15]

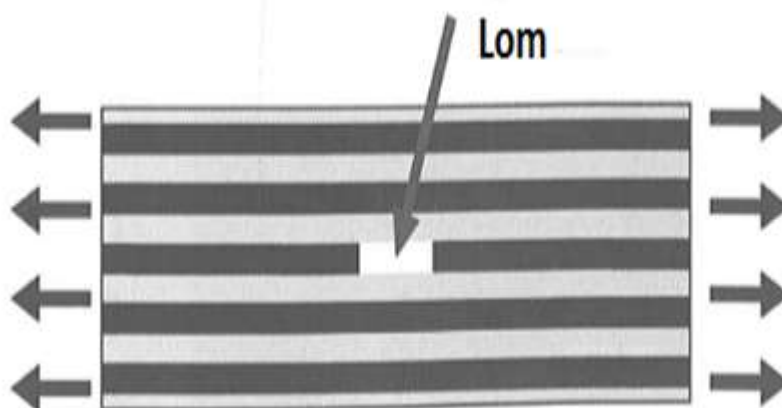
Uloga matrice

Kako vlakna osiguravaju vrlo dobra mehanička svojstva s jedne strane, tako s druge strane matrica osigurava distribuciju vanjskih opterećenja između vlakana te ih na taj način štiti. Polimerna matrica dakle prenosi opterećenja preko vlakno-matrica međufaze pa je iz tog razloga vrlo važna dobra adhezivnost matrice i vlakana. Izbor adekvatne polimerne matrice prilikom izrade kompozita uvelike ovisi o traženim zahtjevima na kompozit. U obzir treba uzeti radnu temperaturu, eventualnu naknadnu obradu i dakako kompatibilnost matrice i ojačala (viskoznost, impregnaciju, močenje i sl.). Kako bi se najbolje predočio utjecaj matrice i međufaze vlakno-matrica na čvrstoću i krutost kompozita na slici je prikazan sloj uzdužno orijentiranih vlakana opterećenih u uzdužnom (L) i poprečnom smjeru (T). Ukoliko se kompozit podvrgne malom uzdužnom vlačnom opterećenju (L) glavnu ulogu će preuzeti vlakna dok će matrica i međufaza vlakno-matrica u ovom slučaju imati gotovo nezamjetnu ulogu. [15]



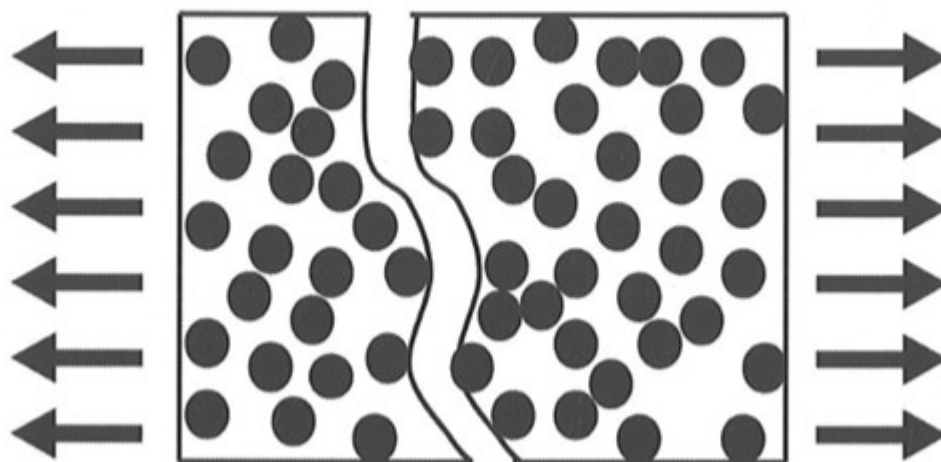
Slika 21. Vlačno napregnuta jednosmjerno orijentirana vlakna [15]

Kako se opterećenje povećava, različitost vlakana u pogledu mehaničkih svojstava dolazi do izražaja. Kako sva vlakna u kompozitu nemaju jednaka mehanička svojstva, ona najslabija će se preopteretiti i na kraju će doći do loma. U okolnom području blizu loma matrica i međufaza vlakno-matrica odigrat će ključnu ulogu i prenijeti opterećenje na obližnja, oblikom postojana vlakna. Konačni lom čitavog kompozita uslijedit će nakon što se sva obližnja vlakna preoptereće i na koncu slome te matrica u tom slučaju više ne može prenositi opterećenje na susjedna vlakna. [15]



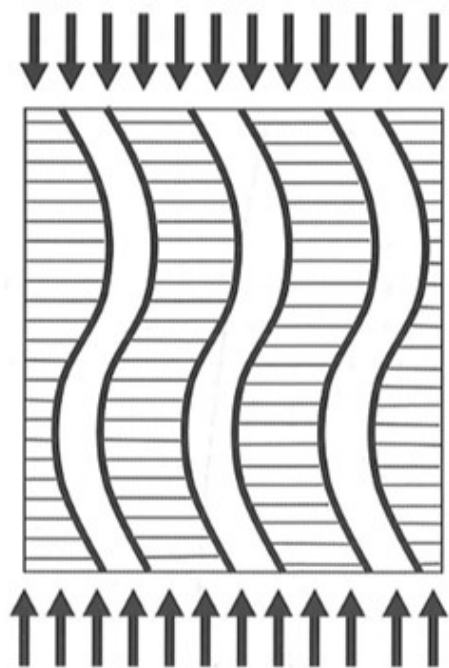
Slika 22. Prikaz loma vlakna uslijed jednosmjernog vlačnog opterećenja [15]

Ako se primijeni poprečno opterećenje na kompozit, vlakna će izgubiti svoju funkciju te će čvrstoću i krutost osiguravati jedino međufaza vlakno-matrica i matrica. Bitno je za naglasiti da će u tom slučaju vrijednost čvrstoće i krutosti biti višestruko manja te se iz tog razloga ovakav tip kompozita u praksi gotovo nikada ne primjenjuje. Uvijek je cilj da vlakna budu orijentirana što više u smjeru opterećenja te tako osiguraju traženu čvrstoću i krutost kompozita. [15]



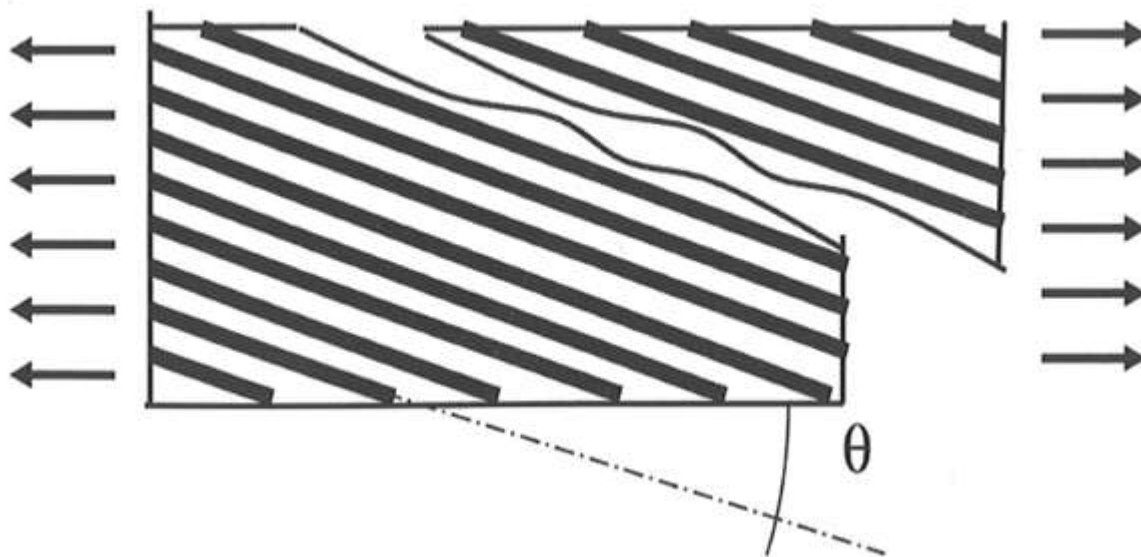
Slika 23. Prikaz loma kompozita uslijed opterećenja okomitog na smjer vlakana [15]

U slučaju uzdužnog tlačnog opterećenja glavni uzrok loma je izvijanje vlakana. Kod ovakvog tipa opterećenja matrica je od presudne važnosti iz razloga što sprječava vlakna da se izviju i zadržava ih u uzdužnom smjeru. [15]



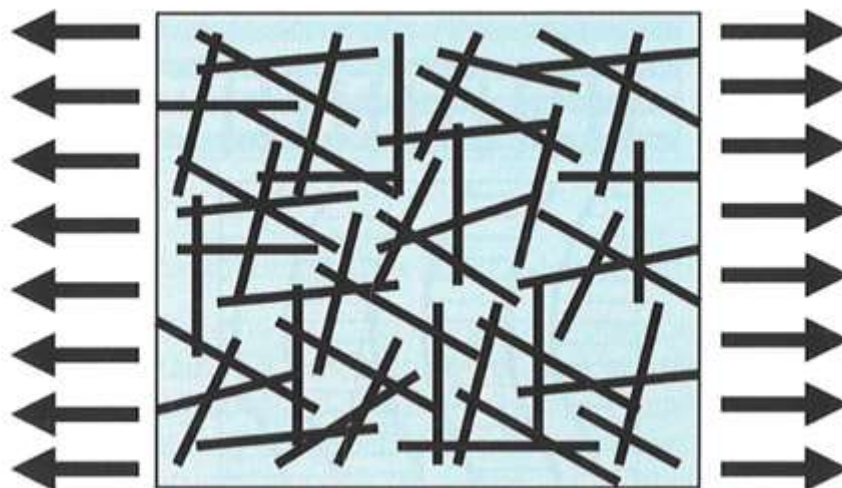
Slika 24. Prikaz uzdužnog tlačnog opterećenja [15]

U slučaju drugačijeg tipa opterećenja koje nije uzdužne ili poprečne prirode do izražaja dolazi smična čvrstoća matrice i međufaze vlakno-matrica. [15]



Slika 25. Prikaz opterećenja pod određenim kutom [15]

Za kompozit ojačan slučajno orijentiranim vlaknima bitno je teže predvidjeti njegovo ponašanje pod utjecajem različitih tipova opterećenja. I u ovom slučaju međufaza vlakno-matrica i matrica moraju biti postojane u slučaju poprečnog opterećenja i smičnog naprezanja.



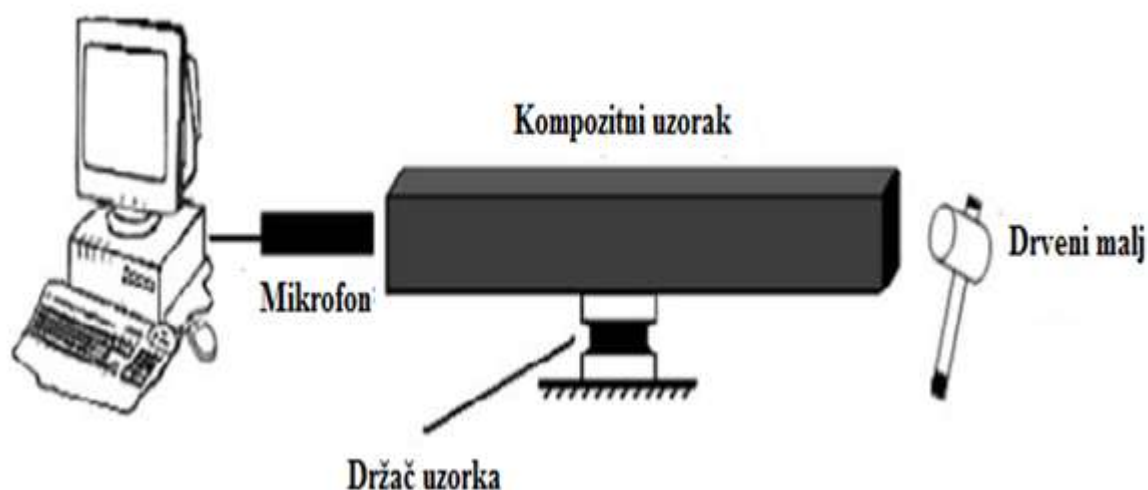
Slika 26. Vlačno opterećen kompozit ojačan slučajno usmjerenim vlaknima [15]

Ovim primjerima prikazana je dakle velika važnost matrice i međufaze vlakno-matrica prilikom eksploatacije kompozita. [15]

8. AKUSTIČNA SVOJSTVA

Akustična svojstva drva čine ga vrlo dobrim materijalom pri izradi mnogih instrumenata kao što su gitara, violina, violončelo, bubanj i sl. Danas se najčešće koriste smreka, javor, mahagonij i topola zbog izvrsnih rezonantnih svojstava i profinjenog estetskog izgleda. Usprkos vrhunskim akustičnim karakteristikama koje imaju navedene vrste drveta javljaju se i određeni nedostaci. Primjerice, kvaliteta zvuka bitno je lošija u vlažnim uvjetima i svojstva svakog izrađenog instrumenta razlikuju se ovisno o morfologiji korištenog drvenog materijala. Neka provedena istraživanja pokazala su da se uporabom kompozitnih materijala takvi problemi mogu ne samo izbjeći, već se mogu bitno poboljšati i mehanička svojstva glazbenih instrumenata. Akustična svojstva materijala danas se procjenjuju nerazornim ispitivanjima pri kojima ne dolazi do oštećenja i nepoželjnih dimenzijskih promjena na uzorcima ispitivanog materijala. Jedna od metoda koja se provodi naziva se rezonantno-vibracijska metoda pri kojoj

se uzorak izlaže torzijskim, transversalnim ili longitudinalnim vibracijama u širokom rasponu frekvencija. U ovom će dijelu rada bit opisan princip ispitivanja akustike materijala izloženog longitudinalnim vibracijama. Na samom početku eksperimenta horizontalno orijentirani uzorak se učvršćuje u centru te se naknadno udara drvenim maljem na jednom od krajeva kao što je prikazano na slici 27. Kako bi se analizirao rezonantni odziv uzorka, na drugoj se strani postavlja mikrofon preko kojeg se zvuk analizira na računalu posebnim programom. Zvučni val definiran je glasnoćom, frekvencijom i vremenom na temelju kojih se npr. pomoću programa u MATLAB-u analizira svaka komponenta zasebno. [16]



Slika 27. Shema ispitivanja materijala izloženog longitudinalnim vibracijama [16]

Brzina zvuka u uzorku izračunava se preko izraza: $v = f \cdot \lambda$ (3)

gdje je: v – Brzina zvuka u uzorku, m/s

f – Rezonantna frekvencija, Hz

λ – Valna duljina, m

Valna duljina izračunava se preko izraza: $\lambda = \frac{2l}{n}$ (4)

gdje je: l – Duljina uzorka, mm
 n – Broj rezonantnih modaliteta

Bitno je za naglasiti da svaki vibrirajući materijal ima beskonačan broj rezonantnih modaliteta. Za prvi rezonantni modalitet vrijedi da je $n = 1$, za drugi modalitet vrijedi $n = 2$ itd. Valna duljina prvog rezonantnog modaliteta prikazana je na slici 28. Također je jasno prikazan raspored rezonantnih horizontalnih čvorova. [16]



Slika 28. Položaj rezonantnih čvorova [16]

Kao što se vidi na slici, jedan čvor nalazi se u centru ispitivanog uzorka dok su druga dva na krajevima. Prema položaju čvorova također se vidi da je valna duljina dvostruko veća od duljine uzorka. Nakon što je izračunata brzina zvuka (v) u uzorku, moguće je odrediti modul elastičnosti materijala (E) kao i specifičnu krutost (omjer E/ρ). [16]

$$E = \rho v^2 \quad (5)$$

Akustični koeficijent moguće je nadalje izračunati preko izraza:

$$K = \left(\frac{E}{\rho^3}\right)^{0.5} \quad (6)$$

gdje je: K – Akustični koeficijent vibrirajućeg tijela

E – Modul elastičnosti materijala, N/mm²

ρ – Gustoća uzorka, g/cm³

Nakon svakog početnog udarca čekićem uzorak počinje vibrirati i s vremenom zbog djelovanja unutarnje sile trenja, vibracijska energija postupno se smanjuje, tj. prelazi u toplinu. Do smanjenja vibracijske energije dolazi zbog faktora prigušenja vibracija koji je različit kod svakog materijala. Smanjenje vibracijske energije kao funkcije vremena ključno je pri određivanju faktora prigušenja vibracija. [16]

Faktor prigušenja vibracija određen je jednačinom:

$$\tan \delta = \frac{\lambda'}{\pi} \quad (7)$$

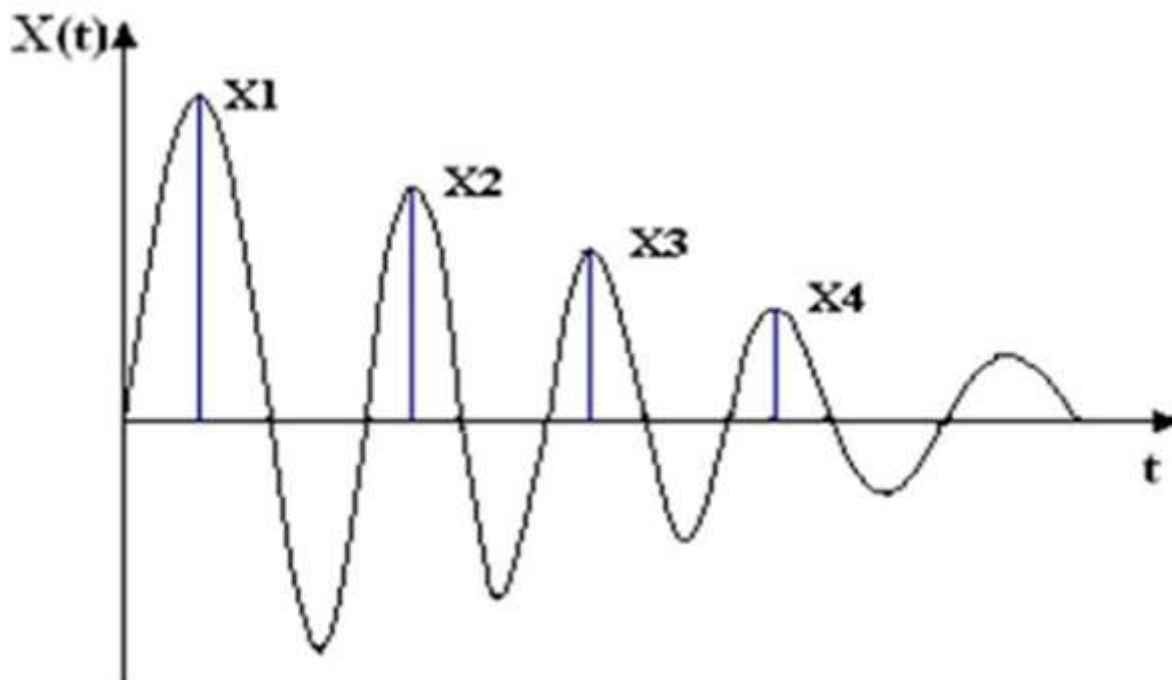
gdje je: $\tan \delta$ – faktor prigušenja vibracija

λ' – logaritamski faktor smanjenja vibracija

Logaritamski faktor smanjenja vibracija (λ') moguće je izračunati iz izraza:

$$\lambda' = \left(\frac{1}{n}\right) \ln \left| \left(\frac{X_1}{X_{n+1}}\right) \right| \quad (8)$$

gdje je: n – vremenski parametar
 X_1 – prva amplituda vibracije
 X_{n+1} – $n+1$ amplituda vibracije



Slika 29. Prikaz smanjenja amplitude vibracija kroz vrijeme [16]

Faktor kvalitete zvuka (Q) i učinkovitost akustične pretvorbe ACE koji su obrnuto proporcionalni faktoru prigušenja vibracija definirani su izrazima:

$$Q = \frac{1}{\tan \delta} \quad (9)$$

$$ACE = \frac{K}{\tan} \quad (10)$$

gdje je: K – Akustični koeficijent vibrirajućeg tijela
 $\tan \delta$ – faktor prigušenja vibracija

Zaključno se može reći kako gustoća materijala ima važnu ulogu pri određivanju akustičnih svojstava materijala. Općenito se može reći kako materijali manje gustoće dulje mogu zadržati energiju vibracija nego materijali veće gustoće. Obrati li se pozornost na jednadžbu (6) vidi se da ukoliko je gustoća materijala manja, akustični koeficijent će biti veći. Uz gustoću iznimnu važnost ima i modul elastičnosti materijala što je također vidljivo u jednadžbi (6). Iz toga proizlazi da materijali velike specifične krutosti predstavljaju idealno rješenje pri konstruiranju glazbenih instrumenata. Pri izboru materijala kompoziti se upravo iz tog razloga čine zanimljivim rješenjem.

9. POSTUPCI PROIZVODNJE KOMPOZITA

Ciklus proizvodnje kompozita ovisit će o vrsti polimera a glavni parametri prilikom proizvodnje kompozitne tvorevine su tlak, temperatura i vrijeme. Kako bi se vlakna uspješno impregnirala s plastomernom matricom nužno je smanjiti viskoznost plastomera da bi on mogao uspješno popuniti prostor među vlaknima. To se postiže povišenjem temperature i tlaka. Duromerne matrice imaju nisku viskoznost prije umrežavanja. Umrežavanje se postiže povišenjem temperature, najčešće u temperaturni interval od 150 °C do 200 °C ili dodavanjem katalizatora ukoliko se za umrežavanje traži sobna temperatura. Usporede li se međusobno kompoziti s plastomernom i duromernom matricom, vide se određene prednosti/nedostatci koje prilikom izrade kompozita obavezno treba uzeti u obzir. [17]

9.1 Biokompoziti s plastomernom matricom

Prednosti uporabe plastomerne matrice u kompozitu u odnosu na duromernu matricu su:

- 1) Niža gustoća
- 2) Mogućnost recikliranja
- 3) Čišća prerada
- 4) Neograničeno vrijeme skladištenja
- 5) Oblikovljivost bez potrebe za preradom predoblika
- 6) Smanjeno vrijeme pripreme kompozitne smjese bez potrebe za kemijskim reakcijama

Kod kompozita s plastomernom matricom moguće je dodati do 60 % volumnog udjela vlakana. Izbor načina proizvodnje kompozita ovisit će o proizvodnoj stopi te o tome je li riječ o poluproizvodu ili gotovom proizvodu. Klasifikacija postupaka bazirana je na vrsti matrice plastomerna/duromerna, statusu proizvoda nakon prerade (radi li se o poluproizvodu ili gotovom proizvodu) i o obliku vlakana (geometriji) nakon prerade. Primjerice injekcijsko kalupljenje zahtjeva unaprijed pripremljene kompozitne granulate, dok se pultrudiranje s druge strane izvodi direktno s vlaknima (prirodnim ili sintetskim). Vrlo je važan i utjecaj postupaka prerade na mehanička svojstva kompozita. Ovisno o budućoj eksploataciji kompozita i vrsti vlakana/matrice, pomno se analizira način prerade. Ukoliko se kompozit koristi isključivo kao ojačanje konstrukcije na kojoj su prisutna veća naprezanja, poželjnija su cjelovita vlakna, postojana svojim oblikom. Komponenta čvrstoće vlakana usko je povezana s omjerom duljina/promjer. Što je veći omjer duljina/promjer bit će dakle veća i čvrstoća vlakna. Povoljan omjer duljina/promjer vlakna omogućuje isto tako da se više opterećenja prenese na vlakno prilikom eksploatacije kompozita. Drugi vrlo važan faktor jest orijentiranost vlakna u odnosu na opterećenje. Povećanjem kuta vlakna u donosu na aksijalnu os opterećenja uzrokovat će smanjenje njegove početne čvrstoće. [17]

Čvrstoća kompozita može se izračunati jednadžbom:

$$R_{m,k} = R_{m,m} (1 - v_v) + \eta_{oE} \eta_{IE} R_{m,vl} v_v \quad (11)$$

gdje je: $R_{m,k}$ - Čvrstoća kompozita, N/mm²

$R_{m,m}$ - Čvrstoća matrice, N/mm²

$R_{m,vl}$ - Čvrstoća vlakna, N/mm²

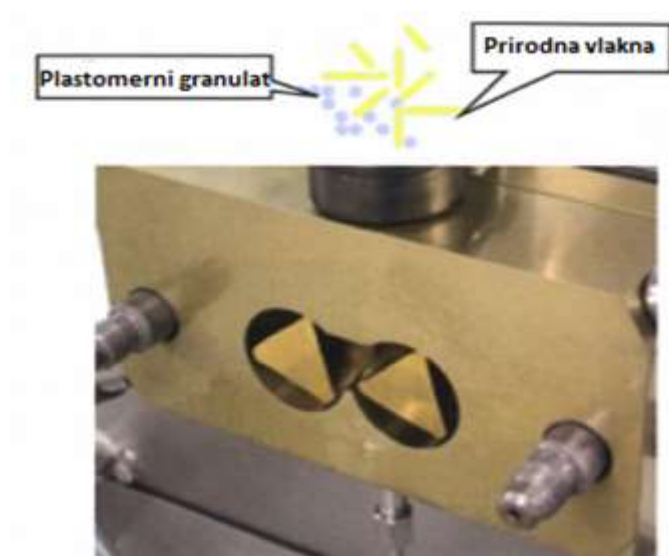
v_v - Specifični volumen vlakna, m³/kg

η_{oE} - faktor orijentiranosti vlakna

η_{IE} - omjer dužina/promjer

Miješenje

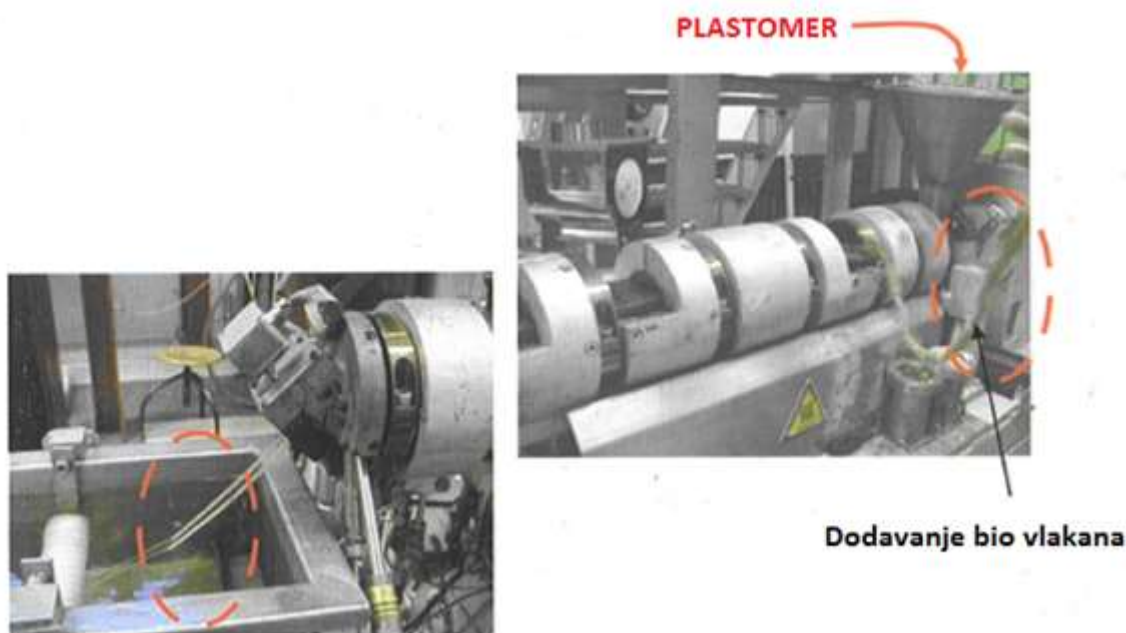
Miješenje je postupak serijske proizvodnje poluproizvoda gdje se pod utjecajem smične sile i temperature formira plastomerni kompozit homogene distribucije vlakana i matrice. U ovom postupku proizvodnje, vlakna se često oštete te se naknadno snižavaju vrijednosti mehaničkih svojstava. Usprkos tome, ovaj postupak danas se često primjenjuje zbog mogućnosti preciznog doziranja vlakana i smole ovisno o potrebi. Vlakna je naime moguće ravnomjerno raspodijeliti unutar smole. Zbog oštećenja vlakana prilikom proizvodnje, ne primjenjuje se za izradu dijelova namijenjenih za ojačanje konstrukcija. Isto tako, vlakna su dimenzijski ograničena te iz tog razloga nije moguće proizvesti kompozite ojačane dugačkim vlaknima. Zbog male proizvodnosti nije namijenjen za veće serije. [17]



Slika 30. Postupak miješenja [17]

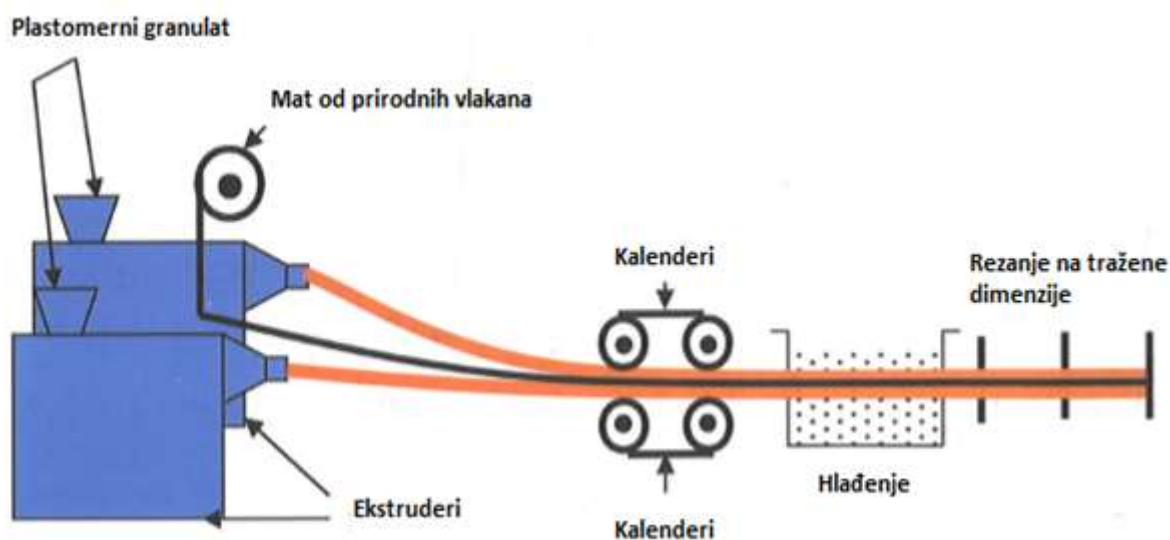
Ekstrudiranje

Kod ovog postupka u ekstruderu se miješaju vlakna i plastomerni granulat kao što se vidi na slici 31. Kod ovog postupka najveći problem predstavlja dodavanje vlakana u ekstruder. U pravilu se uz plastomer u ekstruder polažu iznimno kratka vlakna i drveno brašno. Predivo se najčešće dodaje u ekstruder s druge strane u traženom omjeru i na taj se način regulira homogenost raspodjele vlakana unutar plastomerne matrice. U ovom postupku vrlo je važan parametar temperatura. Glavna je prednost ovog postupka visoka stopa proizvodnosti i mogućnost dobivanja gotovih kompozitnih profila. Jedan od najvećih nedostataka ovog postupka je nemogućnost ravnomjernog dodavanja sadržaja vlakana u ekstruder zbog nekonzistentnosti linearne gustoće vlakana namotanih na valjku. Isto tako potrebno je dosta vremena da se proces uhoda, te se vlakna mogu oštetiti prilikom utjecaja smičnih naprezanja i temperature što utječe na konačna mehanička svojstva kompozita. [17]



Slika 31. Postupak ekstrudiranja [17]

Postoji i drugi način ekstrudiranja, odnosno ojačavanja plastomera s prirodnim vlaknima. Vlakna se isto tako mogu dodavati u obliku mata između dvije ekstrudirane plastomerne ploče. Nakon što se plastomer ekstrudira, zajedno s matom prolazi između valjaka kalandra, točnije kroz postupak kalandriranja. Kalandriranjem se spajaju vlakno i dvije plastomerne ploče i na taj se način dobiva sendvič struktura kompozita. Na kraju se kompozit hladi i reže na tražene dimenzije. [17]

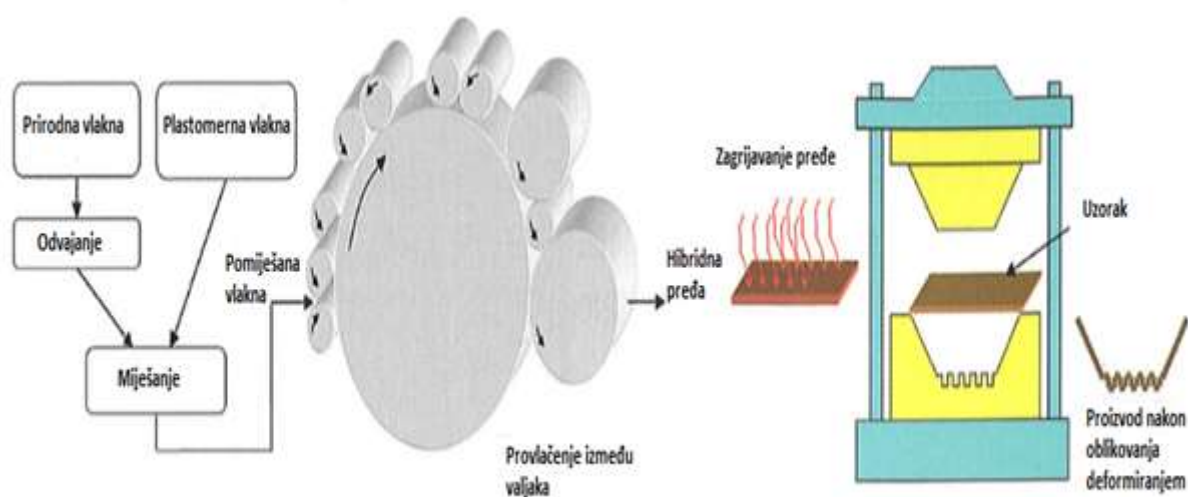


Slika 32. Postupak proizvodnje plastomernog mata [17]

Ovaj postupak je visoke proizvodnosti te se kao ojačanje kompozita u jednakom udjelu mogu koristiti tkani tekstil i netkana vlakna. Problem predstavlja visoka cijena postupka i nemogućnost impregniranja tkanina većih debljina.

Kompresijsko kalupljenje

Tlačno oblikovanje kompozita ojačanih prirodnim vlaknima danas se sve više koristi u autoindustriji, osobito za dijelove unutar kabine automobila. Prirodna vlakna se na početku razdvajaju i miješaju s plastomernim vlaknima. Nakon toga se mješavina provlači između valjaka kako bi se dobila hibridna mreža vlakana kao što se vidi na slici 33. Izrađena mreža zatim se zagrijava omogućujući na taj način tečenje plastomera unutar snopa prirodnih vlakana. Naknadno se uzorak polaže u prešu kojom se postiže konačan oblik gotovog proizvoda. Možemo reći kako je ovo relativno brz postupak visoke proizvodnosti. Uz tu prednost mogu se isto tako proizvesti dimenzijski komplicirani oblici pa je razumljiva njegoa široka upotreba u autoindustriji. Glavni nedostatak je visoka cijena, a i ovisnost kvalitete impregnacije o tekstilnoj strukturi, prvenstveno debljini. [17]

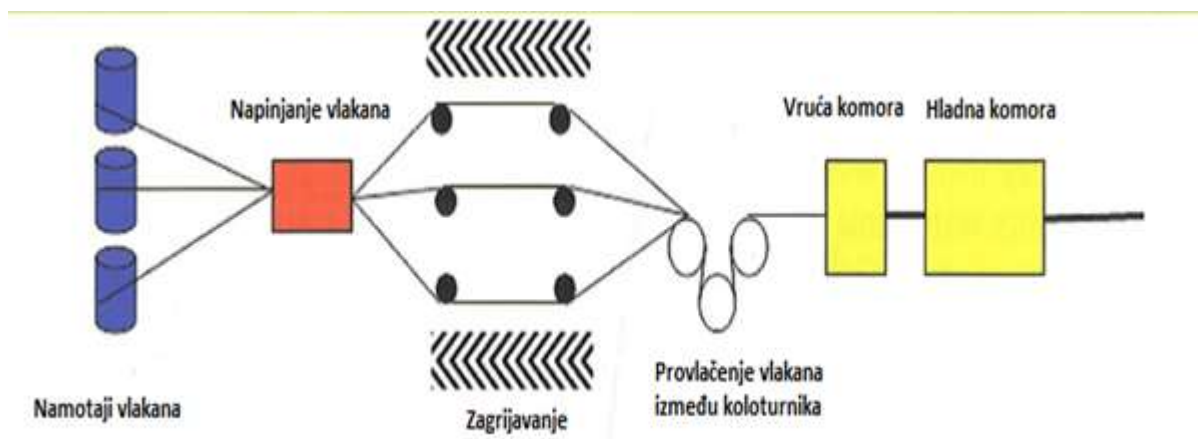


Slika 33. Postupak kompresijskog kalupljenja [17]

Pultrudiranje

Pultrudiranje je postupak proizvodnje kompozita u kojem se u pravilu koriste dva nezavisna namotaja prirodnih i plastomernih vlakana. Ponekad se koriste vlakna međusobno isprepletana na jednom valjku. Na slici 34. prikazan je postupak namatanja plastomernih i prirodnih vlakana na cilindričan profil. Na početku procesa vlakna se ravnomjerno ubacuju i naprežu, nakon čega

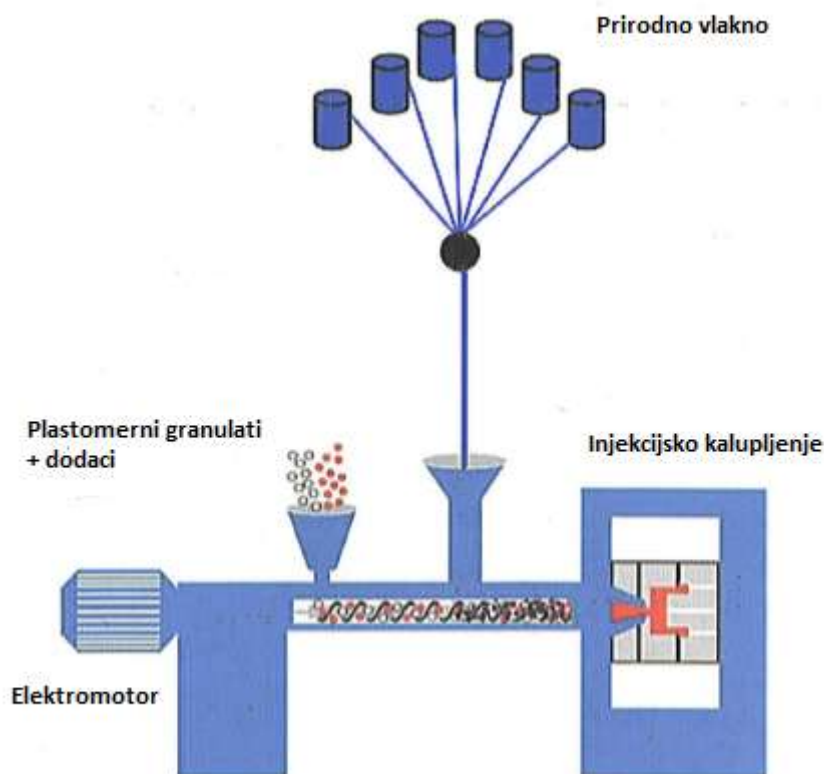
slijedi predgrijavanje i provlačenje preko kolotura. Na kraju postupka vlakna prolaze kroz vruću i hladnu komoru kako bi se postigao što precizniji konačni oblik pultrudiranog kompozita. [17]



Slika 34. Postupak pultrudiranja [17]

Injekcijsko kalupljenje

Injekcijsko kalupljenje relativno je novi postupak u kojem se kompoziti oblikuju iz plastomernog granulata i dugačkih prirodnih vlakana. Vlakna se dakle koriste u svojoj originalnoj veličini i ne režu se. Postupak je danas široko poznat u svijetu pod nazivom D-LFT, od engl. *Direct Long Fiber Thermoplastic Molding*. Glavna prednost ovog postupka jest istovremeno miješanje vlakana, plastomernog granulata i aditiva u jednom koraku što bitno snižava troškove proizvodnje. Shema postupka prikazana je na donjoj slici. [17]



Slika 35. Postupak injekcijskog kalupljenja [17]

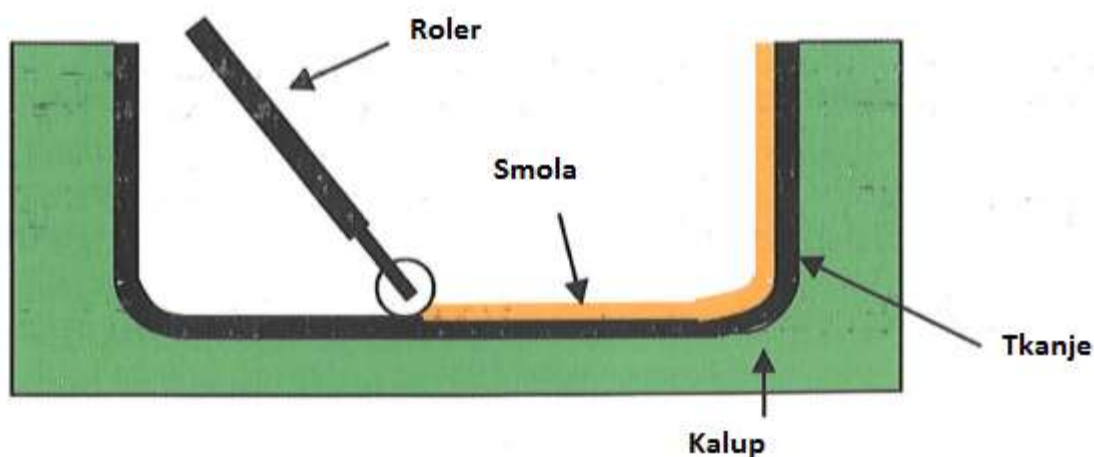
9.2 Biokompoziti s duromernom matricom

Gotovo trećina svih biokompozita koje danas možemo naći na tržištu impregnirana je s duromernom smolom. Iz tog je razloga vrlo važno obratiti pozornost na proizvodnju biokompozita s duromernom matricom, koja je važan utjecajni čimbenik na mehanička svojstva kompozita.

9.2.1 Slaganje u kalup

Slaganje slojeva kompozita u kalup postupak je razvijen u SAD-u prije sedamdeset godina, te se iz tog razloga može reći kako je to najstarija metoda proizvodnje kompozita. Uobičajeno se koriste staklena vlakna u kombinaciji s poliesterskom smolom unaprijed pomiješane s katalizatorom koji pospješuje otvrdnjavanje. Uz poliestersku smolu rjeđe se koriste vinilesterska i fenolna smola. U novije vrijeme ova se metoda isto tako koristi prilikom

formiranja biokompozita. Postupak slaganja u kalup jasno je prikazan na slici 36. Na početku je kalup potrebno očistiti i premazati voskom i tzv. *gel coat*-premazom prije slaganja tkanine i nanošenja smole. Naknadno se tkanja slažu u kalup te se smola ručno impregnira pomoću valjka. Glavne prednosti ovog postupka su jednostavnost, niski troškovi i relativno dobra kvaliteta površine. Glavni je nedostatak što će kvaliteta kompozita (dimenzije, udio vlakana, mehanička svojstva) uvelike ovisiti o vještini radnika. [17]

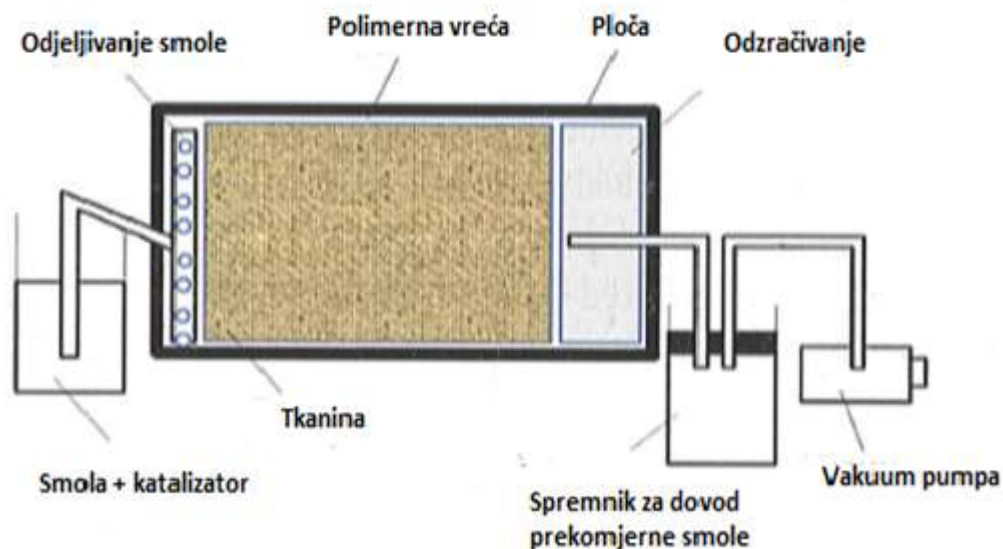


Slika 36. Slaganje u kalup [17]

9.2.2 Podtlačno oblikovanje

Kod ovog se postupka na samom početku prethodno izrezani slojevi tkanja polažu u kalup (najčešće metalna ploča) prethodno premazan odvajalom (vosak). Kalup se zatim zatvori s PA-vrećom i zabrtvi s ljepljivim trakama kako bi se prisutan zrak unutar vreće mogao vakumiranjem uspješno ukloniti. Istovremeno se dovodi odgovarajuća smola s katalizatorom koja pod utjecajem vakuuma natapa tkanja. Nakon što se dovede sva predviđena smola, kompozit se zadržava u vakuumu naredna 24 sata na sobnoj temperaturi. Na kraju se kompozit vadi iz kalupa i pregledava. Kod ovog je postupka najveća prednost visoki stupanj impregnacije odnosno natapanja tkanja sa smolom što utječe pozitivno na mehanička svojstva kompozita. Moguće je isto tako proizvesti kompliciranije oblike. Problem se javlja ukoliko se dovede prevelika količina smole i odvod za smolu nije pravilno postavljen. Postupak nije namijenjen za velikoserijsku proizvodnju iz razloga što je vrijeme potrebno za pripremu kalupa i vrijeme

uklanjanja kompozita iz kalupa (trake, vreća, vakuum pumpa, cijevi za dovod smole i sl.) neprihvatljivo. [17]



Slika 37. Postupak podtlačnog oblikovanja [17]

Propusnost vlakana prirodnog porijekla

Prilikom izrade kompozita ojačanih prirodnim vlaknima bitno je obratiti pozornost na propusnost vlakana. Kod snopa vlakana potrebno je voditi računa o mikropropusnosti unutar vlakana i makropropusnosti oko vlakana. Na propusnost vlakana uvelike se može utjecati kvalitetom impregnacije smole u vlakna. Propusnost vlakana veličina je koja predstavlja otpornost vlakana prema protoku smole kroz porozne dijelove strukture. O ovom svojstvu uvelike ovise mehanička svojstva kompozita.

Propusnost vlakana opisana je Darcijevom jednadžbom:

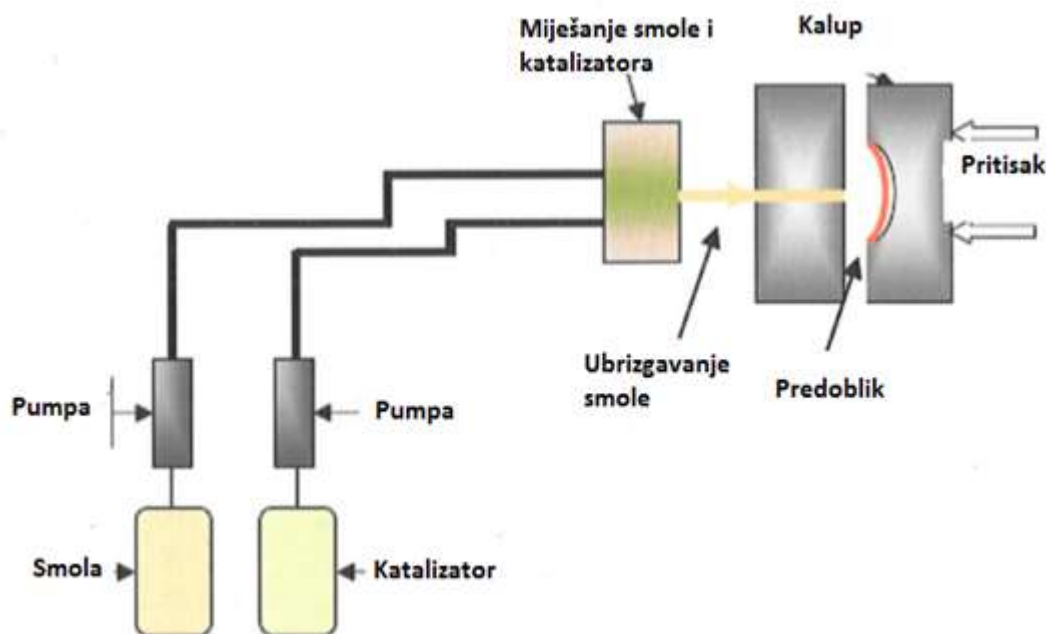
$$V = -K \frac{\nabla P}{\eta} \quad (12)$$

gdje je: V – Darcijev vektor brzine
 η – Newtonov koeficijent viskoznosti tekućine
 ∇P – Gradijent vektora tlaka
 K – Tenzor propusnosti poroznog medija

Iz ove jednadžbe može se jasno vidjeti kako se propusnost može lagano izmjeriti u mirnom i stabilnom stanju gdje vrijedi Darcijeva jednadžba. Mjeri se volumenski protok tekućeg medija i pad tlaka nakon što se izvrši punjenje. Propusnost tekstila prema protoku smole u pravilu se istražuje prije provođenja eksperimenata kako bi se definirali koeficijenti propusnosti, model protoka smole i kako bi se osiguralo da sva smola proteče prije nego se stvrdne. Testiranjem propusnosti tkanja definira se podtlak potreban za impregniranje vlakana u kalupu. Testovi propusnosti bazirani na Darcijevom zakonu pokazali su zanimljive rezultate usporedimo li sintetička i prirodna vlakna. Izračunati koeficijenti propusnosti tkanja od jute kretali su se u rasponu od 205 g/m² do 385 g/m² što je očekivano nešto veći otpor prema protoku smole u usporedbi s ugljičnim i staklenim vlaknima, ali i dalje usporediv. [17]

9.2.3 RTM postupak

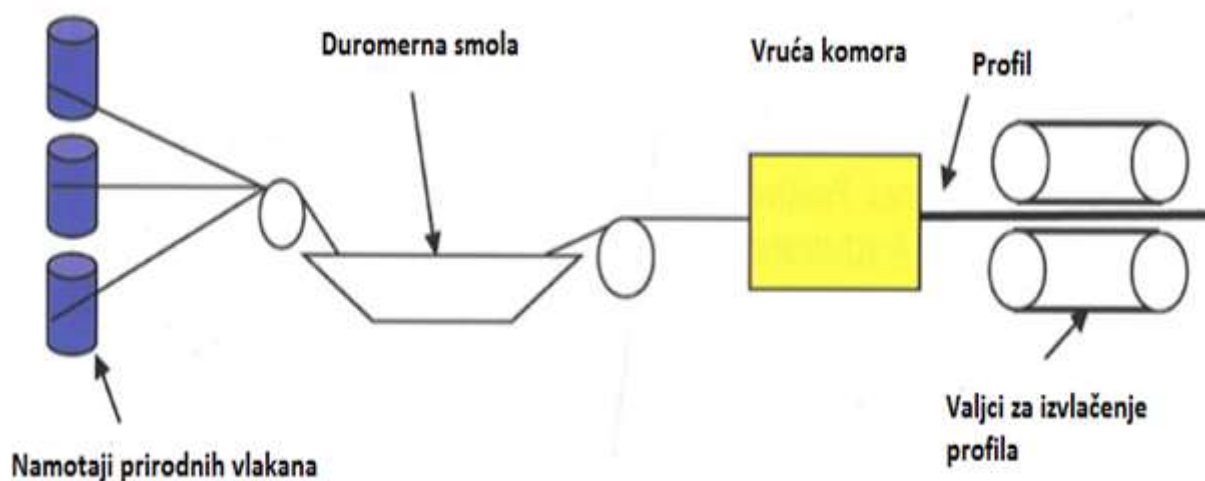
RTM postupak (od engl. *Resin Transfer Molding*) razvijen je još tijekom 70-ih godina prošlog stoljeća i nalik je podtlačnom oblikovanju izuzme li se tlačenje uzorka u rasponu od 1-5 bara. Kod ovog proizvodnog postupka duromerna smola i katalizator ubrizgavaju se odvojeno u komoru gdje se miješaju prije nego što se ubrizgaju u kalup i stvrdnu. Postupak je prikazan na slici 38. Glavne prednosti ovog postupka su dimenzijska točnost, manje otpadnog materijala, odlična kvaliteta površine kompozitnog dijela i visoka proizvodnost. Postupak je pogodan za velikoserijsku proizvodnju. Glavni nedostatak je visoka cijena.



Slika 38. RTM postupak [17]

9.2.4 Pultrudiranje

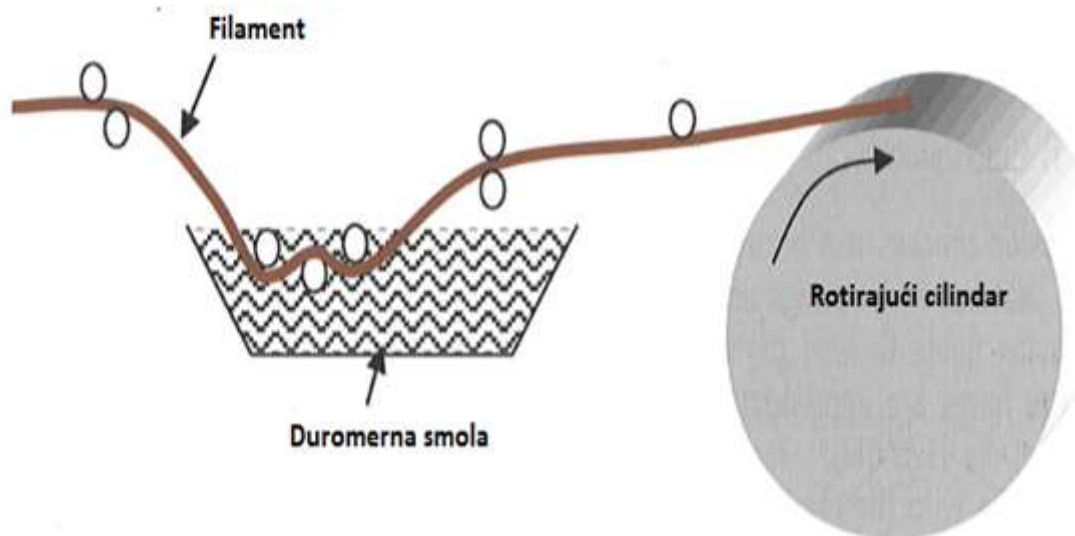
Pultrudiranje je postupak u kojem se pored sintetskih vlakana mogu koristiti i vlakna prirodnog porijekla. Kao što je prikazano na slici 39., vlakna su smještena na postolje cilindričnog oblika i formirani su namotaji. Naknadno se vlakna provode kroz kupku u kojoj se nalazi nezasićena epoksidna ili poliesterska smola. Impregnirana vlakna zatim skrutnu unutar peći. Za vlakna impregnirana poliesterskom smolom primjenjuje se temperatura $120\text{ }^{\circ}\text{C} - 160\text{ }^{\circ}\text{C}$, dok vlakna impregnirana epoksidnom smolom skrućuju na $200\text{ }^{\circ}\text{C} - 220\text{ }^{\circ}\text{C}$. Niti se na kraju rotirajućim valjcima izvlače iz peći i oblikuju u željeni oblik. Glavna prednost ovog postupka je što dugačka jednosmjerno orijentirana i smolom impregnirana vlakna daju kompozitu odlična mehanička svojstva u smjeru djelovanja opterećenja. Isto tako, postiže se visoka kvaliteta površine i volumni udio prediva u pultrudiranom profilu do 70 %. S druge strane, postupak nije namijenjen za velikoserijsku proizvodnju zbog male proizvodnosti. Brzina izrade kompozitnih profila ograničena je vremenom skrućivanja smole u peći. Postupak je također vrlo skup. [17]



Slika 39. Postupak pultrudiranja [17]

9.2.5 Namotavanje filamenata

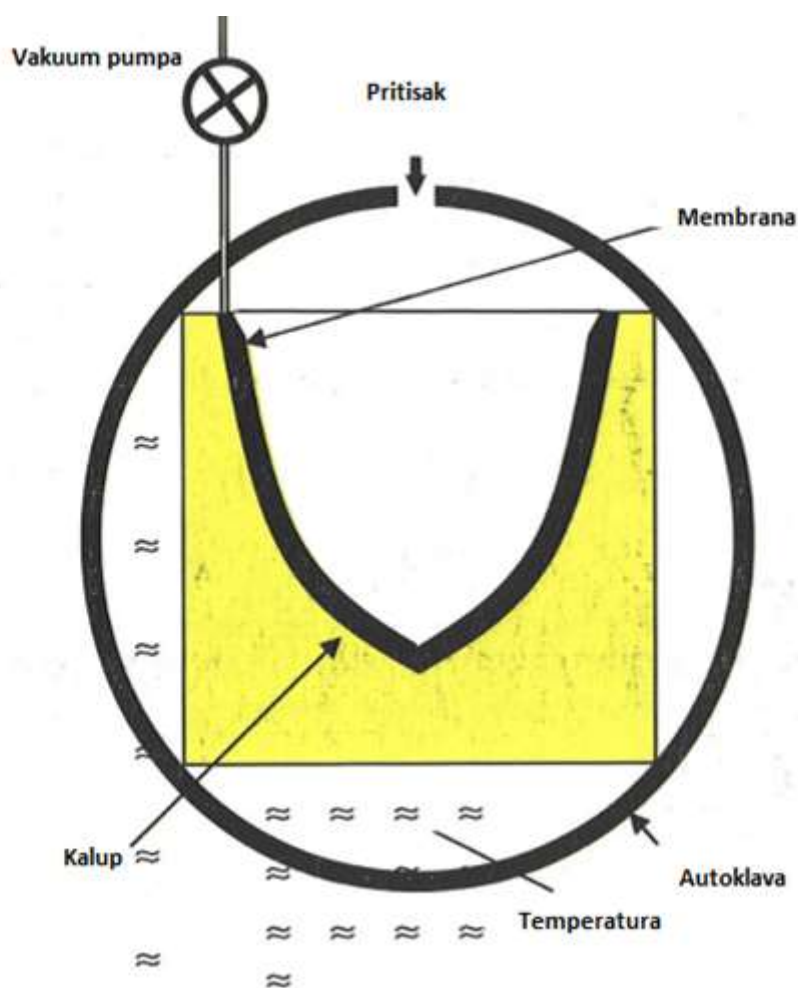
Namotavanje filamenata postupak je proizvodnje kompozitnih tvorevina gdje se impregnirana vlakna namotavaju oko rotirajućeg vretena. Na taj način oblikuje se željeni, najčešće cilindrični oblik proizvoda. I kod ovog postupka proizvedeni kompozit pokazuje bolja mehanička svojstva, posebno vlačnu čvrstoću. Razlog tome su dugačka, jednoosno orijentirana i dobro impregnirana vlakna. Mogu se proizvesti i veliki dijelovi prema potrebi. Poteškoće se mogu pojaviti prilikom uklanjanja vretena kojim se prethodno oblikovao kompozit.



Slika 40. Namotavanje filamenata [17]

9.2.6 Autoklav

Proces izrade kompozita u autoklavu danas je u automobilske i zrakoplovne industrije najučestaliji postupak proizvodnje kompozita. Pod istovremenim utjecajem vakuuma, tlaka i temperature moguće je proizvesti dijelove različitih dimenzija i kompliciranih oblika. Dijelovi ojačala se na početku režu na željene dimenzije i postavljaju u autoklavnu komoru prije nego se komora zatvori. Vakuum se primjenjuje kako bi se spriječilo zaostajanje mjehurića zraka u strukturi i ishlapljivanje smole pod povišenom temperaturom, čime bi kompozit gubio na mehaničkim svojstvima. Isto tako, tlak i temperatura se primjenjuju kako bi se pospješilo skrućivanje smole i formiranje željenog oblika. Proizvedene dijelove odlikuje visoka krutost, čvrstoća i prije svega specifična čvrstoća (omjer vlačne čvrstoće i gustoće). Ovim postupkom proizvodnje ne oštećuju se vlakna i moguće je uvelike iskoristiti teoretski početni potencijal vlakana u pogledu mehaničkih svojstava. Ovim postupkom se pored kompozita ojačanih sintetskim vlaknima mogu isto tako proizvesti i biokompoziti. [17]



Slika 41. Shema postupka u autoklavu [17]

10. EKSPERIMENTALNI DIO

10.1 Nabava lanenog preprega, kalupa i izrada probe

U eksperimentalnom dijelu rada razmatrane su mogućnosti i način izrade stijenke bubnja od lanenog preprega. Nakon detaljne pretrage odlučeno je da će se prepreg naručiti od londonske tvrtke Elmira koja se bavi proizvodnjom biokompozitnih poluproizvoda. Prikupljena su novčana sredstva i naručeno je 5 dužnih metara (115 cm x 85 cm) lanenog preprega, gustoće vlakana 275 g/m² s 45 % udjela biorazgradive CNSL-smole (engl. *Cashew Nut Shell Liquid*). U prehrambenoj industriji se naime preradom indijskih orašćića dobiva i tekući nusproizvod tamno smeđe boje iz ljuski orašćića, koji se može upotrijebiti u kompozitnoj industriji kao polimerna matrica. Obrati li se pozornost na strukturu indijskog oraha, jasno se može vidjeti kako se unutar 3 mm debele ljuske nalazi sačasta struktura koja sadržava spomenutu smolu u obliku sjemenog omotača. Kako je danas potraga za isplativim i obnovljivim materijalima sve učestalija, uloga CNSL-smole od posebnog je značaja. Upravo iz razloga što je obnovljiva, često puta dobiva prednost u odnosu na sintetičke prerađevine. [19]

Pored obnovljivosti glavne prednosti CNSL-smole su:

- 1) Elastičnost
- 2) Topljivost u organskim otapalima
- 3) Dobra obradivost
- 4) Otpornost na trošenje
- 5) Dobra elektrootpornost
- 6) Dobra otpornost na vlagu
- 7) Dobra otpornost na djelovanje kiselina i lužina
- 8) Kompatibilnost s drugim polimerima prilikom eksploatacije
- 9) Otpornost na djelovanje mikroba i insekata

Nedugo nakon narudžbe lanenog preprega izrađen je kalup od čeličnog lima promjera 300 mm i visine 330 mm. Dimenzije su određene sukladno dimenzijama drvenog 12" bubnja kako bi naknadna usporedba akustičnih svojstava bila mjerodavna. Kalup je izrađen u strojobraverskoj radionici Franjević, nedaleko od Zagreba.



Slika 42. Laneni prepreg



Slika 43. Kalup od čeličnog lima

Sukladno mogućnostima i raspoloživom alatu odlučeno je kako će se kompozitna stijenka bubnja izraditi podtlačnim postupkom oblikovanja u peći. Omogućena je oprema potrebna za izvođenje spomenutog postupka. Prije početka izrade stijenke, potrebno je bilo razmisliti o parametrima postupka i mogućim greškama prilikom izrade zbog kojih bi se izgubila značajna količina materijala. Iz tog je razloga prvo napravljena jedna proba. Iskorištena je mala limenka kave Nescafe kao imitacija kalupa na koju je naknadno višestruko nanesen vosak i 2 do 3 sloja preprega. Omotana je tkanina za odjeljivanje i apsorpcijska tkanina kojoj je zadatak bio da upije eventualni višak smole. Na kraju pripreme eksperimenta omotana limenka polegnuta je u PA foliju i zabrtvljena trakom kako bi se omogućio traženi podtlak. Temperatura u peći je postavljena sukladno specifikacijama proizvođača lanenog preprega. Za potpuno umrežavanje smole i otvrdnjavanje proizvođač preporučuje temperaturu od 120 °C u vremenskom intervalu od 90 minuta. Nakon što se peć zagrijala na traženu temperaturu, uključena je vakuumaska pumpa i postupak je mogao početi.



Slika 44. Provedeni postupak podtlačnog oblikovanja

Rezultati provedenog eksperimenta nisu zadovoljili. Glavni problem bio je odvajanje kompozitnog uzorka od kalupa. Uzorak se naime nije mogao odvojiti nakon čega je primijenjena sila pri čemu je došlo do loma kompozitnog uzorka.



Slika 45. Lom kompozitnog uzorka

10.2 Izrada kompozitnog bubnja

Nakon neuspješno izvedene probe u pogledu odvajanja uzorka s kalupa, potrebno je bilo dobro razmisliti na koji način uspješno realizirati idejni projekt. Kako je već do tada bio potrošen popriličan iznos novaca za nabavu materijala i izradu kalupa, odustajanje nije dolazilo u obzir. S druge strane raspravljalo se o nabavi drugog tipa odvajala koje bi dalo tražene rezultate. Kao glavni problem, pored odvajala, manifestirale su se i mikro neravnine na izrađenom kalupu. Kako je teoretski idealni promjer u praksi teško realizirati, dimenzije izrađenog kalupa odstupale su ± 1 mm ovisno o području. Kako su se javili problemi kod odvajanja kompozitne probe s limenke kave ujednačenih dimenzija po obodu, u ovom slučaju veliku stijenku bubnja bilo bi nemoguće odvojiti od kalupa korištenjem i najboljeg odvajala dostupnog na tržištu. Prva ideja bila je da se od kalupa naprave 3 dijela i naknadnim izbijanjem središnjeg dijela bitno lakše odvoji stijenka bubnja. Može se reći da je ideja bila i više nego prihvatljiva izuzev dodatnih visokih troškova modificiranja kalupa jer se naime u ovom slučaju radilo o složenijim operacijama obrade odvajanjem čestica. Od ove se ideje iz tog razloga ipak odustalo i

naknadnim razgovorima odlučilo da se kao odvajalo upotrijebi kuhinjski papir za pečenje. Napravljene su kompozitne test pločice koje su stavljene u peć i opterećene silom od 100 N. Provedeni eksperiment bio je uspješan jer smola nije prošla kroz papir na uteg i pripremljeni lim. Iz tog je razloga odlučeno da se kao odvajalo kod izrade kompozitne stijenke bubnja upotrijebi kuhinjski papir za pečenje. Nedugo nakon toga mogla je započeti izrada prvog bubnja. Papir za pečenje namotao se po cilindričnom dijelu oplošja bubnja i zalijepljen je ljepljivom trakom. Kako je opseg drvenog bubnja 96 cm, a visina 25 cm, izrezani su slojevi preprega dimenzija 100 cm · 26 cm. Slojevi su rezani na taj način da vlakna buduće stijenke budu međusobno okomito usmjerena zbog postizanja što veće čvrstoće. Odlučeno je da se pri izradi stijenke bubnja primijene četiri sloja preprega. Princip slaganja slojeva bio je dakle definiran usmjerenjem vlakana. Naizmjenice su slagani slojevi s uzdužno i poprečno orijentiranim vlaknima.



Slika 46. Slojevi papira omotani oko kalupa



Slika 47. Izrezani slojevi od lanenog preprega



Slika 48. Postupak slaganja slojeva oko kalupa

Nakon što su namotana četiri sloja lanenog preprega potrebno je bilo postaviti opremu za podtlačno oblikovanje. Isto kao i kod prethodne probe, na slojeve preprega prvo se postavila tkanina za odjeljivanje. Nakon toga omotana je tkanina za upijanje prekomjerne smole (tkanina zelene boje na slici 50.) te se na kraju se zabrtvila PA folija obostrano ljepljivom trakom. Također je izbušena rupa u PA foliji za postavljanje ventila vakuumske pumpe. Postupak postavljanja potrebne opreme bio je identičan kao i kod prethodne probe uz razliku između primijenjenih odvajala. Omotani kalup potom se stavio u peć na temperaturu od 120 °C i pod tlak od 0,8 bara u vremenskom intervalu od 120 minuta. Preostali postupak može se vidjeti na idućim slikama.



Slika 49. Omotana tkanina za odjeljivanje (eng. *peel ply*)



Slika 50. Omotana tkanina za upijanje prekomjerne smole



Slika 51. Kalup zabrtvljen PA folijom



Slika 52. Postupak vakumiranja



Slika 53. Polaganje omotanog kalupa u peć



Slika 54. Izbijanje kalupa



Slika 55. Dobivena stijenka bubnja od lanenog kompozita

Odvajanje dobivene stijenke bubnja od čeličnog kalupa uspješno je provedeno zahvaljujući slojevima papira za pečenje između stijenke i kompozita. Međutim, dobiveni prototip u pogledu estetskog izgleda nije zadovoljio. Obrati li se pozornost na površinu kompozitne stijenke, vide se površinske nepravilnosti koje je uzrokovao vakuum: slojevi su se naborali za vrijeme vakumiranja i toplinske obrade zbog visokog podtlaka i na taj način su nastale greške na površini. Također, jedan od razloga nastalih neravnina su i dimenzijska odstupanja kalupa koja su se naknadnim namatanjem slojeva manifestirala na površini. Zbog ograničenih dimenzija laboratorijske peći, ventil vakuumske pumpe morao se postaviti na samu stijenku kompozitnog bubnja umjesto na gornji dio čeličnog kalupa, što je uzrokovalo otisak ventila ili žig na gotovoj stijenci bubnja. Pri izradi novog bubnja potrebno je bilo obratiti pozornost na nastale greške i promjenom parametara vakumiranja, folije, ventila i slaganja slojeva poboljšati gotov proizvod. Iz tog su se razloga prilikom izrade novog bubnja slojevi još pažljivije namatali uz stijenku kalupa prethodno omotanog papirom i podtlak se također smanjio s 0,2 bara na 0,8 bara kako bi se izbjegle naknadne deformacije na površini. Dobivena kompozitna stijenka estetski je zadovoljila i problem neravnina na površini bio je uklonjen kao što se vidi na slici 53. Međutim, promjer nove stijenke je zbog smanjenog vakuuma bio prevelik za postavljanje polimerne membrane bubnja. Također, međuslojna čvrstoća bila je bitno lošija jer se slojevi zbog smanjenog vakuuma nisu međusobno dobro povezali.



Slika 56. Druga stijenka od lanenog kompozita

Kako se pored problema površinskih deformacija javio i problem prekomjernih dimenzija stijenke, potrebno je bilo pronaći najbolje rješenje odnosno kompromis kako bi se uklonili navedeni problemi. Iz tog je razloga pri izradi treće stijenke umjesto PA vreće primijenjen sloj elastomerne (gumene) folije koja je nategnuta preko namotanih slojeva lanenog preprega. Cilj je bio da se uz napregnutu gumu i tlak od 0,6 bara ukloni mogućnost dimenzijskih odstupanja, kao i mogućnost nastajanja grešaka na površini. Guma je zabrtvljena ljepljivom aluminijskom trakom otpornom na rad pri traženoj temperaturi od 120 °C.



Slika 57. Slojevi kompozita napregnuti gumom i zabrtvljeni Al trakom



Slika 58. Oprema za podtlačno oblikovanje



Slika 59. Zabrtvljeni kalup u peći



Slika 60. Toplinski obrađena kompozitna stijenka

Naknadnim izbijanjem kalupa dobivena je stijenka manjeg promjera i zadovoljavajućeg estetskog izgleda - broj grešaka na površini bitno je smanjen. Međutim, dobiveni promjer stijenke kompozitnog bubnja i dalje je nešto veći od promjera polimerne membrane usporednog drvenog bubnja i pripadajućih prstenova. Usprkos tome, zaključeno je da se bubanj može sastaviti i da je za izradu stijenke bubnja nešto manjeg promjera u sljedećem koraku, pored većeg vakuuma, potreban i za 2 - 3 mm manji čelični kalup. Kako se radi o odstupanjima gotove stijenke bubnja od + 2 mm u odnosu na drvenu stijenkbu bubnja i kako je za nabavu novog kompozitnog materijala i novog čeličnog kalupa nedostajalo novčanih sredstava, zaključeno je da se dobivena kompozitna stijenka bubnja uzme u obzir za ispitivanja akustičnih svojstava kompozitnog bubnja. Kako bi se dijelovi bubnja mogli sklopiti, potrebno je na izrađenoj stijenci bubnja izbušiti provrte za vijke. Potrebno je bilo izbušiti sveukupno 38 rupa za metalne komponente: 32 jednako razmaknute rupe za lagove, 5 rupa za eventualno naknadno montiranje bubnja na središnji stalak za sviranje i jednu rupu za odušak zraka. Prije bušenja, raspored rupa je bilo potrebno skicirati na papiru istih dimenzija kao što je kompozitna stijenka bubnja, pazeći pritom na pravilan raspored rupa. Naknadno se papir sa skiciranim rupama omotao oko kompozitne stijenke bubnja.



Slika 61. Skicirane i izbušene rupe

Nakon bušenja i prije montiranja metalnih komponenti, na stijenku je nanesen mat sloj laka otporan na ogrebotine, UV-zračenje i atmosferilije. Premazana stijenka je ostavljena da se isuši i otvrdne tijekom 24 sata tijekom kojih su također dodani metalni obruči kako bi se održao cilindričan oblik stijenke. Sloj je također dodatno poboljšao estetski izgled stijenke što se može vidjeti na slici 62. Slika 63. prikazuje gotov, sklopljen kompozitni bubanj.



Slika 62. Premazana stijenka bubnja



Slika 63. Sklopljeni kompozitni bubanj

10.3 Izrada epruveta i ispitivanje mehaničkih svojstava

Pored izrade stijenke bubnja također je bilo potrebno izraditi epruvete i ispitati mehanička svojstva. Od preostalog materijala izrađene su epruvete za ispitivanje vlačne čvrstoće, savojne čvrstoće, međuslojne čvrstoće i udarnog rada loma normiranih oblika i dimenzija. Veličina epruveta određena je prema normama ovisno o ispitivanom mehaničkom svojstvu. Ispitivanja mehaničkih svojstava napravljena su u Laboratoriju za polimere i kompozite na Fakultetu strojarstva i brodogradnje. Zbog slabe rezljivosti toplinski obrađenog kompozita, epruvete su prvo izrezane iz preostalog materijala te su naknadno toplinski obrađene na 120 °C pod podtlakom od 0,6 bara.



Slika 64. Izrezane epruvete

10.3.1 Ispitivanje vlačne čvrstoće

U uvjetima normalnog jednoosnog vlačnog statičkog naprezanja, osnovna mehanička svojstva određuju se statičkim vlačnim pokusom. Ispitivanje se provodi na kidalicama ili univerzalnim ispitivalicama na kojima se epruvete kontinuirano vlačno opterećuju do loma. Pri ispitivanju se kontinuirano mjere sila i produljenje epruvete. Dimenzije epruveta određene su u skladu s normom HRN EN ISO 3167. [18]

Ispitna epruveta opteretila se silom i za svaku ispitnu epruvetu očitano je odgovarajuće produljenje za sile opterećenja. U trenutku loma epruvete, očitana je maksimalna sila. Ispitane su tri epruvete, a dobiveni rezultati uvršteni su u tablice te iskorišteni za izračun vlačne čvrstoće i modula elastičnosti.

Vlačna čvrstoća računa se prema izrazu:

$$R_m = \frac{F_{max}}{S_0}, \text{ N/mm}^2 \quad (13)$$

gdje je:

R_m – vlačna čvrstoća, N/mm²

F_{max} – maksimalna sila opterećenja, N

S_0 – površina početnog poprečnog presjeka, mm²

Rastezni (vlačni) modul elastičnosti računa se pomoću izraza:

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} = \frac{\Delta F}{ab} \frac{l_0}{\Delta x}, [\text{N/mm}^2] \quad (14)$$

gdje je:

E - modul elastičnosti, N/mm²

$\Delta F / \Delta x$ - nagib interpolacijskog pravca u dijagramu sila –produljenje

a, b – dimenzije početnog poprečnog presjeka, mm

l_0 – početna mjerna duljina (iznosi 50 mm prema normi)

Prije ispitivanja su pomičnim mjerilom izmjerene dimenzije kompozitnih epruveta (širina i debljina) od lanenih vlakana.

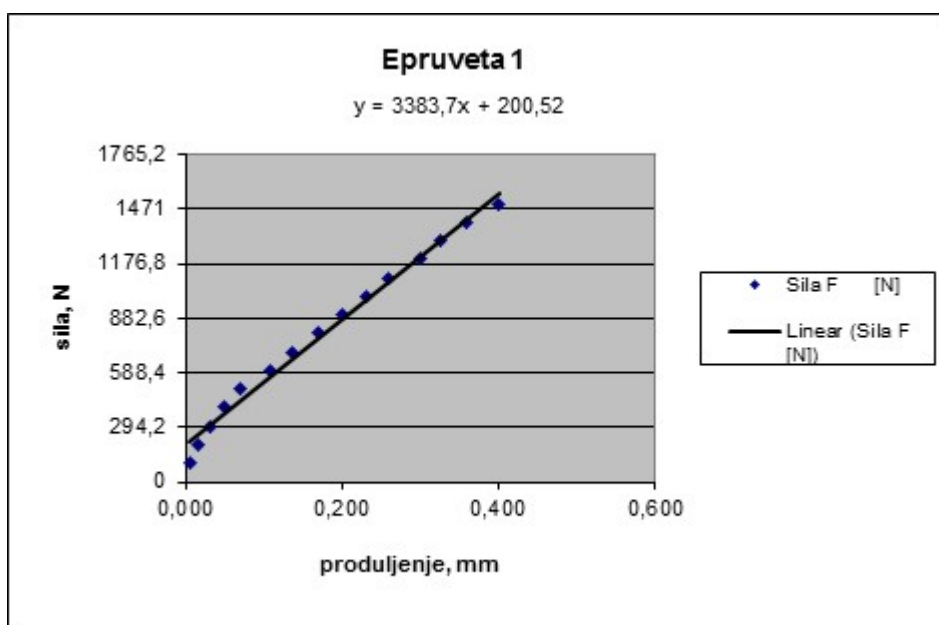


Slika 65. Kidalica na kojoj je izvršeno vlačno ispitivanje

U tablicama 4., 5. i 6. prikazana su produljenja epruveta ojačanih lanenim vlaknima u ovisnosti o sili pri statičkom vlačnom pokusu. Vrijednosti sila i produljenja naknadno su popraćene dijagramima.

Tablica 4. Produljenja epruvete 1 pri statičkom vlačnom pokusu

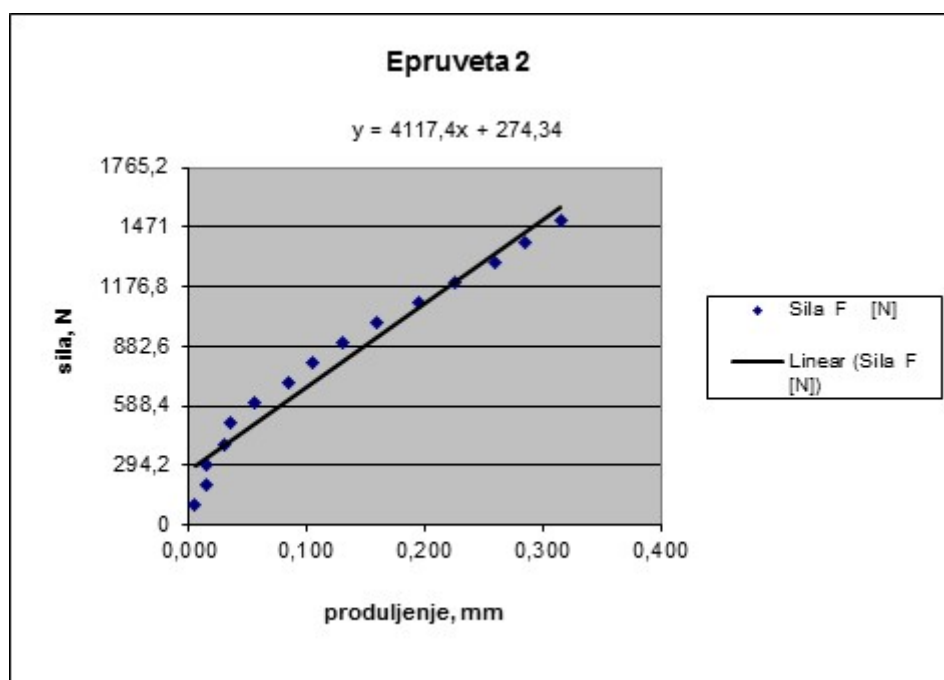
Epruveta 1			
Produljenje, lijevo [mm]	Produljenje, desno [mm]	Produljenje, srednje [mm]	Sila, F [N]
0,00	0,01	0,005	100
0,01	0,02	0,015	200
0,02	0,04	0,030	300
0,04	0,06	0,050	400
0,06	0,08	0,070	500
0,10	0,12	0,109	600
0,12	0,15	0,135	700
0,15	0,19	0,169	800
0,19	0,21	0,200	900
0,21	0,25	0,230	1000
0,24	0,28	0,260	1100
0,28	0,32	0,300	1200
0,31	0,34	0,325	1300
0,34	0,38	0,360	1400
0,38	0,42	0,400	1500



Slika 66. Dijagram sila – produljenje za epruvetu 1

Tablica 5. Produljenja epruvete 2 pri statičkom vlačnom pokusu

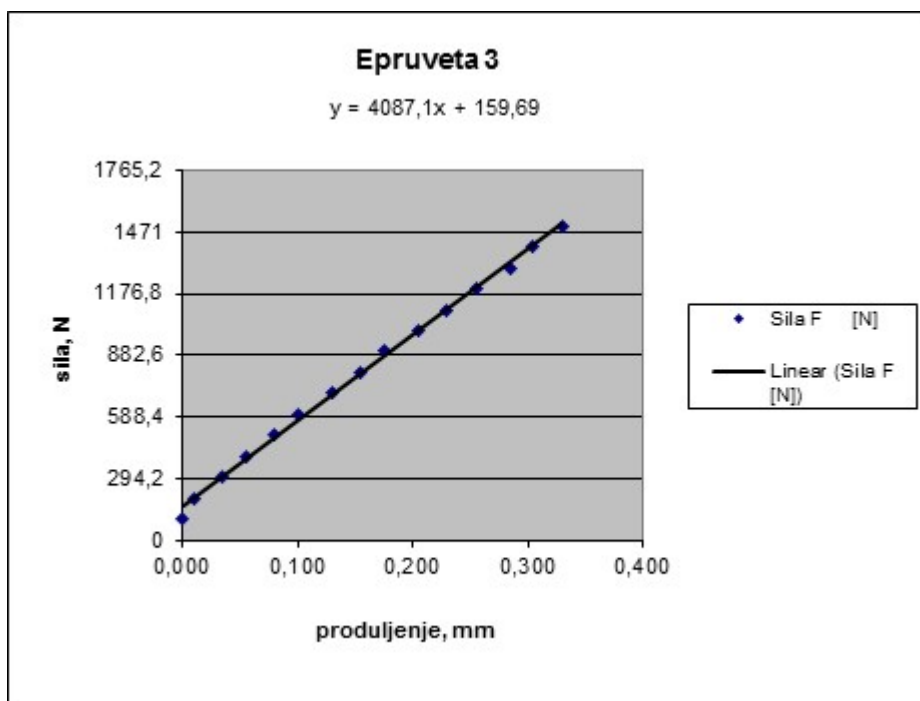
Epruveta 2			
Produljenje, lijevo [mm]	Produljenje, desno [mm]	Produljenje, srednje [mm]	Sila, F [N]
0,00	0,01	0,005	100
0,01	0,02	0,015	200
0,01	0,02	0,015	300
0,02	0,04	0,030	400
0,02	0,05	0,035	500
0,04	0,07	0,055	600
0,07	0,10	0,085	700
0,09	0,12	0,105	800
0,11	0,15	0,130	900
0,14	0,18	0,160	1000
0,18	0,21	0,195	1100
0,21	0,24	0,225	1200
0,24	0,28	0,260	1300
0,27	0,30	0,285	1400
0,30	0,33	0,315	1500



Slika 67. Dijagram sila – produljenje za epruvetu 2

Tablica 6. Produljenja epruvete 3 pri statičkom vlačnom pokusu

Epruveta 3			
Produljenje, lijevo [mm]	Produljenje, desno [mm]	Produljenje, srednje [mm]	Sila, F [N]
0,00	0,00	0,000	100
0,01	0,01	0,010	200
0,01	0,06	0,035	300
0,03	0,08	0,055	400
0,05	0,11	0,080	500
0,07	0,13	0,100	600
0,10	0,16	0,130	700
0,12	0,19	0,155	800
0,14	0,21	0,175	900
0,17	0,24	0,205	1000
0,20	0,26	0,230	1100
0,22	0,29	0,255	1200
0,25	0,32	0,285	1300
0,27	0,34	0,305	1400
0,31	0,35	0,330	1500



Slika 68. Dijagram sila – produljenje za epruvetu 3

Tablica 7. Dimenzije i mehanička svojstva pojedinih epruveta

REDNI BROJ EPRUVETE			
	1	2	3
b [mm]	10,73	11,86	11,30
h [mm]	2,17	1,96	2,09
S_0 [mm ²]	23,28	23,25	23,62
F_{max} [N]	2380	2680	2660
R_m [N/ mm ²]	102	115	113
$\Delta F / \Delta x$ [N/mm]	3383,7	4117,4	4087,1
E [N/ mm ²]	7266	8856	8653

10.3.2 Ispitivanje savojne čvrstoće

Oblici i dimenzije epruveta ovise o vrsti materijala koji se ispituje, a one mogu biti okrugla ili četvrtasta poprečnog presjeka. U ovom su se radu ispitivale epruvete četvrtastog poprečnog presjeka trotočkastim ispitivanjem, najčešće primjenjivanim ispitivanjem. Pri takvom ispitivanju epruveta se opterećuje u sredini raspona savojnom silom F_s pa je na tom mjestu maksimalni savojni moment M_{smax} . Za svaku epruvetu mjerio se odgovarajući progib za sile opterećenja. Epruveta se opterećivala sve do loma pri maksimalnoj sili.

Savojna čvrstoća izračunava se izrazom (vrijedi za trotočkasto ispitivanje) :

$$R_{ms} = \frac{3 \cdot F_{max} \cdot L}{2 \cdot b \cdot h^2}, N/mm^2 \quad (15)$$

gdje je:

R_{ms} – savojna čvrstoća, N/mm^2

F_{max} – maksimalna sila opterećenja, N

L – razmak između oslonaca, mm

b – širina ispitnog uzorka, mm

h – debljina ispitnog uzorka, mm

Savojni modul elastičnosti računa se pomoću izraza:

$$E_s = \frac{L^3}{4 \cdot b \cdot h^3} \cdot \frac{\Delta F}{\Delta f}, [\text{N/mm}^2] \quad (16)$$

gdje je:

E_s - savojni modul elastičnosti, $[\text{N/mm}^2]$

$\frac{\Delta F}{\Delta f}$ - nagib pravca, $\text{tg}\alpha$

Sukladno normi HRN EN ISO 14125/2005 ispitano je po 3 epruvete. Ispitivanje se provodilo bilježenjem progiba epruveta prilikom opterećenja. Prije ispitivanja su pomičnim mjerilom izmjerene dimenzije kompozitnih epruveta (širina i debljina) od lanenih vlakana.

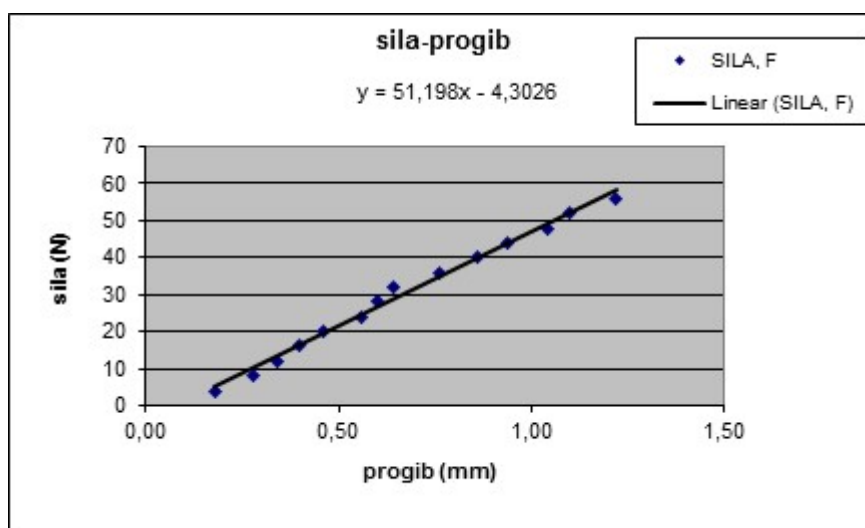


Slika 69. Trotočkasto savojno ispitivanje na kidalici

U tablicama 8., 9. i 10. prikazana su progibi kompozitnih epruveta ojačanih lanenim vlaknima u ovisnosti o savojnoj sili. Progibi su očitavani po petnaest puta u razmaku opterećenja od 4 N. Vrijednosti progiba i opterećenja naknadno su popraćene dijagramima.

Tablica 8. Progibi epruvete 1 pri opterećenju

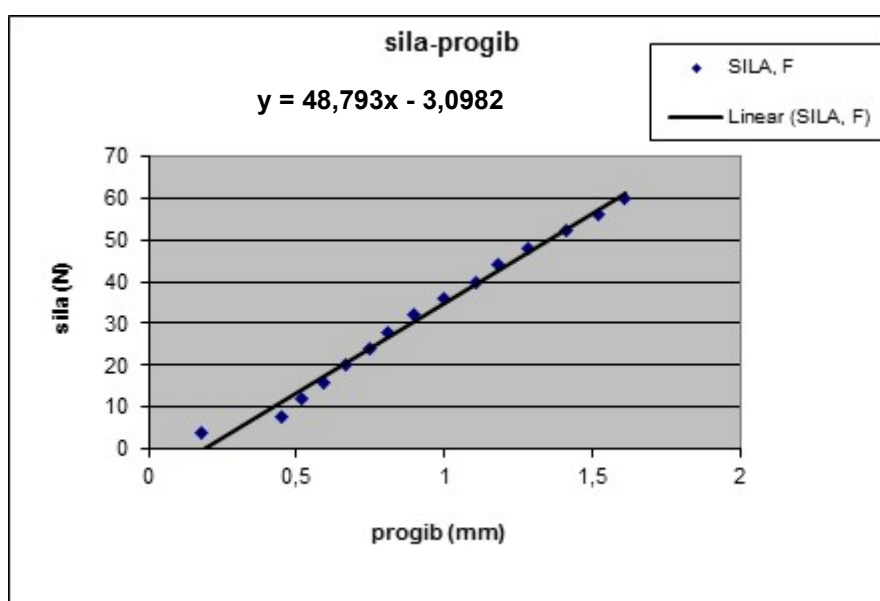
Epruveta 1	
Progib f [mm]	Sila F [N]
0,18	4
0,28	8
0,34	12
0,40	16
0,46	20
0,56	24
0,60	28
0,64	32
0,76	36
0,86	40
0,94	44
1,04	48
1,10	52
1,22	56
1,32	60



Slika 70. Dijagram sila – progib za epruvetu 1

Tablica 9. Progibi epruvete 2 pri opterećenju

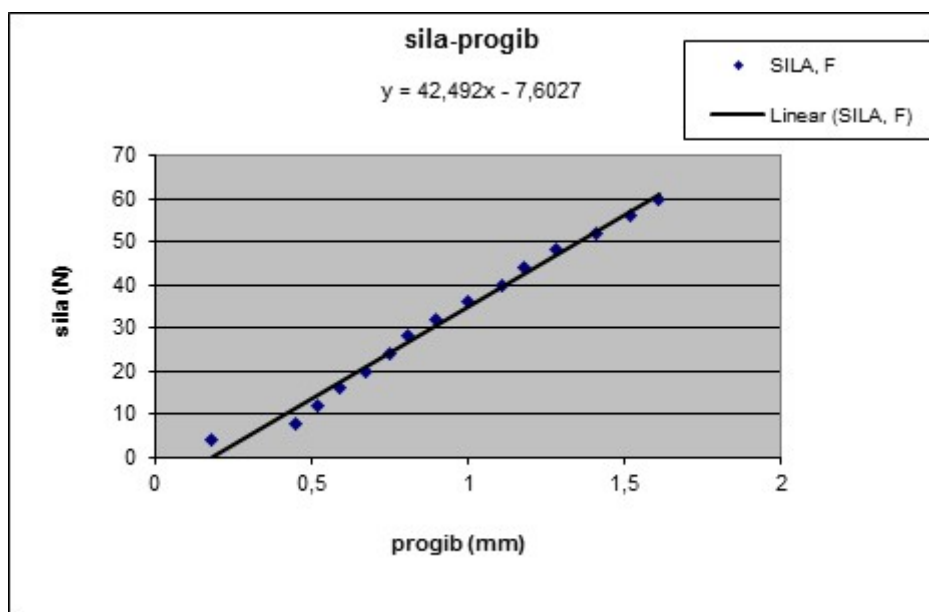
Epruveta 2	
Progib f [mm]	Sila F [N]
0,15	4
0,27	8
0,32	12
0,39	16
0,47	20
0,56	24
0,61	28
0,70	32
0,78	36
0,86	40
0,95	44
1,04	48
1,13	52
1,23	56
1,33	60



Slika 71. Dijagram sila – progib za epruvetu 2

Tablica 10. Progibi epruvete 3 pri opterećenju

Epruveta 3	
Progib f [mm]	Sila F [N]
0,18	4
0,45	8
0,52	12
0,59	16
0,67	20
0,75	24
0,81	28
0,90	32
1,00	36
1,11	40
1,18	44
1,28	48
1,41	52
1,52	56
1,61	60



Slika 72. Dijagram sila – progib za epruvetu 3

Tablica 11. Dimenzije i mehanička svojstva pojedinih epruveta

REDNI BROJ EPRUVETE			
	1	2	3
b [mm]	15,88	16,6	16,12
h [mm]	2,45	2,25	2,07
L [mm]	40	40	40
F_{max} [N]	105	118	110
R_{ms} [N/mm ²]	66	87	96
$\frac{\Delta F}{\Delta f}$ [N/mm]	51,198	48,793	42,492
E_s [N/mm ²]	3508	4129	4755

10.3.3 Ispitivanje žilavosti



Slika 73. Ispitivanje žilavosti na Charpyjevom batu

Ispitivanje se izvodilo na Charpyjevom batu prema normi HRN EN ISO 179 – 1. Uzorak epruvete stavlja se na oslonce te se spušta bat s određene visine i lomi je. S uređaja se očitava količina energije, izražena u joulima [J] koja je potrebna za lom epruvete. Udarni rad loma (žilavost) računa se prema izrazu:

$$A_{cU} = \frac{E_c}{b \cdot h} \cdot 10^3, \text{ kJ/m}^2 \quad (17)$$

gdje je:

E_c – korigirana energija loma, J

b – širina ispitnog uzorka, mm

h – debljina ispitnog uzorka, mm

A_{cU} – Charpyjeva udarna žilavost na uzorcima bez utora, [kJ/m²]

Mehaničko svojstvo udarnog rada loma izražava se po površini poprečnog presjeka. U donjoj tablici prikazani su rezultati mjerenja udarnog rada loma za kompozit ojačan lanenim vlaknima. Navedene su širina i debljina ispitnog uzorka, očitane količine energije potrebne za lom ispitnog uzorka te konačno udarni rad loma.

Tablica 12. Rezultati ispitivanja udarnog rada loma

Epruveta	b [mm]	h [mm]	L [mm]	E_c [kp cm]	E_c [J]	A_{cu} [J/mm ²]	A_{cu} [kJ/m ²]
1	11,27	2,15	43	8,70	0,89	0,037	36,61
2	11,53	2,48	49,6	8,10	0,83	0,029	28,89
3	10,88	1,98	39,6	9,60	0,98	0,045	45,44

10.3.4 Ispitivanje međuslojne čvrstoće

Međuslojna čvrstoća predstavlja mjeru za kvalitetu granične površine, odnosno međusloja. Čimbenici koji utječu na međuslojnu čvrstoću su čvrstoća prijanjanja vlakana s matricom, veličina dodirnih površina vlakana i adhezija na površini. Kako je prethodno spomenuto, iznimno je važna dobra adhezija vlakana i matrice, tj. uloga međusloja. Nužno je da se opterećenje prenosi s polimerne osnove na vlakna za ojačanje i iz tog razloga je potrebno obratiti pozornost na granično područje. Ispitivanja međuslojne čvrstoće provedena su prema normi EN ISO 14130/1997 na kidalici ili univerzalnoj ispitivalici. Ispitane su 3 epruvete i naknadno su zabilježeni rezultati.

Međuslojna čvrstoća računa se prema izrazu:

$$\tau = \frac{3 \cdot F_p}{4 \cdot b \cdot h}, \text{ MPa} \quad (18)$$

gdje je:

τ – međuslojna čvrstoća, MPa

F_p – prekidna sila, N

b – širina ispitnog uzorka, mm

h – debljina ispitnog uzorka, mm

Tablica 13. Rezultati ispitivanja međuslojne čvrstoće

Epruveta	h [mm]	b [mm]	$L = 15 \times h_{sr}$ [mm]	F_{max} [N]	τ [N/mm ²]
1	2,23	10,02	33,90	112	3,76
2	2,11	10,79	33,90	93	3,06
3	2,44	10,10	33,90	105	3,20

10.4 Ispitivanje akustičnih svojstava

Zadatak ovog diplomskog rada bio je i usporediti akustična svojstva proizvedenog biokompozitnog bubnja s akustičkim svojstvima drvenog bubnja istog oblika i dimenzija. Stoga nakon što su uspješno sklopljeni, bubnjevima su uspoređena akustična svojstva. Ispitivanje je provedeno u Soundcage studiju kod gospodina Marijana Gudelja, klavijaturista poznate glazbene skupine Jinx koji se godinama bavi analizom zvuka pojedinih instrumenata. Općenito kad se govori o akustičnim svojstvima obuhvaća se jako širok pojam iz razloga što se radi o posebnoj grani znanosti o zvuku. Može se reći da je akustika interdisciplinarna znanost koja se bavi proučavanjem zvučnih valova i posljedičnih vibracija u različitim medijima, kao što su kruta tijela, tekućine i plinovi. Na samom početku ispitivanja akustičnih svojstava potrebno je bilo postaviti drveni i kompozitni bubanj na središnji stalak i podesiti mikrofoni preko kojeg se naknadno na računalu očitavala frekvencija rezonantnog odziva.



Slika 74. Montirani mikrofoni na drvenom i kompozitnom bubnju

Nakon što su postavljeni mikrofoni, potrebno je bilo u pravilnim razmacima unutar određenog vremenskog intervala udarati naizmjenično membrane bubnjeva. U susjednoj se prostoriji na računalu istovremeno očitavala frekvencija i provodila kalibracija zvuka. Potrebno je bilo pronaći frekvenciju prisutnih smetnji (šumova) i anulirati ih. Za usporedbu akustičnih svojstava instrumenata traži se izoštrjeni rezonantni odziv iz kojeg je moguće naknadno dati realan prikaz zvučnih valova.

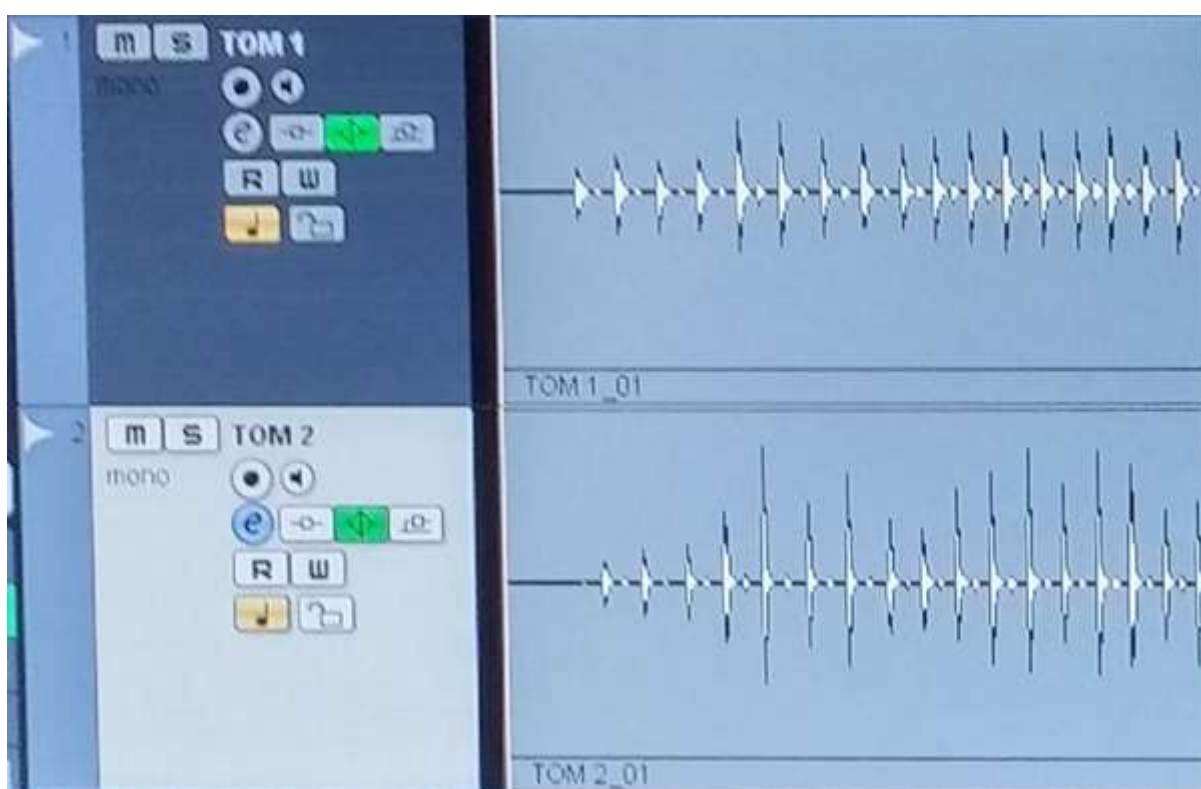


Slika 75. Oprema za mjerenje akustičnih svojstava

Iz razloga što je dobivena kompozitna stijenka svojim promjerom odstupila od tražene početne dimenzije, nije bilo u potpunosti moguće zategnuti polimernu membranu. Zatezanjem vijaka deformirala bi se kompozitna stijenka pa je u tom slučaju gotovo nemoguće bilo adekvatno zategnuti polimernu membranu. Kao posljedica navedenih problema javili su se dugački rezonantni odzivi sa spomenutim smetnjama (šumovi).



Slika 76. Podešavanje frekvencija drvenog i kompozitnog bubnja



Slika 77. Usporedba kompozitnog (Tom 1) i drvenog (Tom 2) bubnja

Na slici 77. dana je usporedba rezonantnih odziva Tom1 (kompozitnog) i Tom2 (drvenog bubnja). Obrati li se pozornost na zapise može se zamijetiti kako je rezonantni odziv kompozitnog bubnja (Tom 1) dulji. Jasno se vidi kako su varijacije, odnosno karakter zvučnih valova drugačiji. Osnovna je razlika u trajanju proizvedenog zvuka od početnog impulsa gdje zvuk postiže punu snagu do trenutka kada se on anulira. Na 204 Hz su se uklonile rezonantne smetnje i dobio se čisti ton, odnosno oštriji i kraći rezonantni odziv. Usporedbom tona drvenog i kompozitnog bubnja zaključilo se kako je ton kompozitnog bubnja značajno dublji (bas) i izraženiji. Jedinstvena zvučna svojstva rezultat su vrlo dobrog akustičnog koeficijenta kompozitne stijenke.

Općenito govoreći, teško je zaključiti koji bubanj je kvalitetniji. Oba ispitivana bubnja su nositelji jedinstvenih akustičnih karakteristika i izbor optimalnog bubnja ovisio bi zapravo o osobnim preferencijama bubnjara. Kako se osobna mišljenja glazbenika razlikuju, tako se razlikuje i primjena drvenog, metalnog ili kompozitnog bubnja.

11. ZAKLJUČAK

Zeleni kompoziti ojačani prirodnim vlaknima danas predstavljaju zanimljivo rješenje u glazbenoj industriji. U morfološkom pogledu, prirodna vlakna karakterizira šuplja struktura koja omogućuje odlično prigušenje energije vibracija te su iz tog razloga prikladan izbor pri izradi instrumenata. U pogledu mehaničkih svojstava, karakterizira ih vrlo dobra specifična krutost zbog male gustoće ($1,4 \text{ g/cm}^3 - 1,5 \text{ g/cm}^3$). Sukladno maloj gustoći manja je i masa, što je pored akustičnih svojstava još jedna velika prednost za glazbenike. Može se reći da je izazov uporabe glazbenih instrumenata ojačanih prirodnim vlaknima u prirodnoj smoli ne samo tehnološkog, nego i društvenog karaktera iz razloga što je glavni zadatak uz poboljšanje mehaničkih, fizikalnih, akustičnih i ostalih svojstava, isto tako i buđenje svijesti kod ljudi u smjeru održivog razvoja.

Prilikom izrade glazbenog instrumenta bubnja od zelenog kompozita i usporedbe s drvenim bubnjem navedena svojstva došla su do izražaja te se može zaključiti sljedeće:

- masa izrađene kompozitne stijenke bez metalnih komponenti iznosila je 550 grama, što je za 350 grama ili gotovo 40 % manja masa u odnosu na korištenu drvenu stijenku,
- kompozitna stijenka bubnja daje jedinstvena zvučna svojstva različita od drvene stijenke,
- postupak izrade kompozitne stijenke bitno je jednostavniji i jeftiniji od postupka izrade drvene stijenke. Kompozitna stijenka nema lijepljenih spojeva za razliku od drvene stijenke,
- naknadni postupci OOČ kompliciraniji su kod izrade kompozitne stijenke što je bitan nedostatak,
- primijenjeni zeleni kompozit izgledom je vrlo sličan drvetu čime se očuvala jedna od glavnih prednosti drveta u pogledu prirodnog estetskog izgleda, što kod metalnih stijenki i konvencionalnih kompozitnih stijenki nije slučaj,
- proizvodnja kompozita ojačanih vlaknima prirodnog porijekla bitno je jeftinija i energetski isplativija u usporedbi s proizvodnjom sintetskih kompozita pa je samim time i niža cijena konačnog proizvoda (bubnja),
- u ovom je radu prikazana inovacija koja u budućnosti može zaživjeti u glazbenoj industriji.

Literatura

- [1] Mougin, G., *JEC composites: Colloque AFT – F.R.D.*, 2011.
- [2] Holland, J., *JEC composites: Percussion*, Schirmer Books, 1978.
- [3] www.lonestarpercussion.com/Concert/Concert-Snare-Drums,
www.lonestarpercussion.com [15. 4. 2016.]
- [4] Marching Tenor Drums _ Marching _ Steve Weiss Music.htm,
www.steveweissmusic.com [15. 4. 2016.]
- [5] MB-8200 Series Bass Drum - Marching Bass Drums - Marching Instruments - Musical Instruments - Products - Yamaha United States.htm, usa.yamaha.com [15. 4. 2016.]
- [6] A Sale Is Booming Rare Stradivarius Drums Up For Auction Deceptive Cadence NPR.htm, www.npr.org [16. 4. 2016.]
- [7] Acoustic Drums Buying Guide.htm, www.sweetwater.com [16. 4. 2016.]
- [8] Eder, M., Burgert, I., *JEC composites: Natural fibres – Function in Nature*, 2010
- [9] Mussig, J., Fischer, H., Graupner, N., Drieling, A., *Source JEC composites: Testing Methods for Measuring Physical and Mechanical Fibre Properties*, 2010
- [10] Thygesen, L. G., Eder, M., Burgert, I., *Source JEC composites: Dislocations in single hemp fibres – investigations into the relationship of structural distortions and tensile properties at the cell wall level*, 2007
- [11] Davies, G., Bruce, D., *Source JEC composites: Effect of Environmental Relative Humidity and Damage on the Tensile Properties of Flax and Nettle fibers*, 1998
- [12] Bos, H. L., *Source JEC composites: The potential of Flax Fibres as Reinforcement for Composite Materials*, 2004
- [13] Denton, M. J. and Daniels, P. N., *Source JEC composites: Textile Terms and Definitions*
- [14] Naik, N.K., V.M., *Source JEC composites: Twisted impregnated yarns: elastic properties*
- [15] Smith R., *Source JEC composites: Biodegradable polymers for industrial applications*, 2005
- [16] Mohammad, M. J., Seyyed, Y. M., Amir, S. P., *Investigating the Acoustical Properties of Carbon Fiber, Glass Fiber and Hemp Fiber Reinforced Polyester Composites*
- [17] Akil, E. A., *Source JEC composites: Composite Science and Technology* 69, 2009
- [18] Franz, M., Kovačiček, F., Novosel, M., Indof, J., *Inženjerski priručnik ip4*, 1. svezak, ŠK, Zagreb, 1998.

- [19] The Cashew Export Promotion Council of India.htm, <http://cashewindia.org/cashew-nut-shell-liquid> [1. 5. 2016.]